文春新書

177

〝放射能〟は怖いのか

放射線生物学の基礎

佐藤満彦

文藝春秋

〝放射能〟は怖いのか

放射能は恐怖の代名詞。しかし、「その何が怖いのか」と問われて、きちんと説明できる人は多くはない。放射能は放射線を発する能力なのに、よく「放射能が漏れる」といった誤った使い方がされるのも、こうした無理解と無縁ではなかろう。本書は、放射能の実体である放射線が生物にどんな影響を与えるのか、放射線生物学の最新の知見を紹介し、微量ならば肯定的に作用しうることも明らかにする。要は「正しく知って、正しく怖がる」ことなのだ。

〝放射能〟は怖いのか

放射線生物学の基礎

佐藤満彦

文春新書

177

〝放射能〟は怖いのか　目次

第一章　〝放射能〟という言葉

一　ある経験と調査

のっけから私事にわたって恐縮であるが、私の放射線とのかかわり合いについて述べさせていただきたい。それが本書を著すに至った動機にもなっているからである。

もう四半世紀も前のことになるが、私の勤務していた大学がその放射性物質（ラジオアイソトープ）の取り扱いが適法に行われているか、について監督行政庁の立ち入り検査を受けたことがあった。たまたまそちらの方のお手伝いをしていた、というただそれだけの理由で、逃げ腰の賢兄諸氏によって検査官の前に押し出され、彼らの質問の矢面に立たされた愚生に、法律の用語でもってする指弾が遠慮会釈なく浴びせられた。その意味がほとんど理解できず、苦渋のあまり萎縮しているとすかさず飛んでくる、「それでも大学の先生ですかっ！」という難詰が、私の自尊心を少なからず傷つけた。ラジオアイソトープの取り扱いは正規の資格（「放射線取扱い主任者」という）をもつ管理責任者を頂点に置いた体制で行うように、というのが彼らの指導だった。この言いつけに合点がいって、というよりは、踏みにじられた自尊心の修復

のために、二カ月後に実施されるという国家試験に向け、気がついたときには猛勉強を始めていた。そのおり、あの若僧の放射線検査官が連発した法律用語が理解できるようになって、目から鱗がどんどん落ちていく爽快な気分になったことを、今でも思い出す。さいわい（いや、後の実感としては不幸にも）この国家試験に合格はしたものの、その先がたいへんだった。管理という仕事は、場所（いわゆる管理区域）の管理、放射性物質（放射線源）の管理、そして管理区域の中で放射性物質を扱う人間の管理という三つの面をもち、大学内の慣行や約束に従ってというよりは、むしろそれを離れ、場合によってはそれに背を向け、国法を上位に置いてその番犬に徹しないとできない。これら三種の管理はいわば三位一体だが、とりわけ難儀するのは、三番目の、研究者の自由度を奪いかねない法律という名の「権力」を楯にとって、人の心と体を動かす人間管理である。人間操作を好まぬ愚生は、何度かこの雑業を放棄しようという思いにかられながらも、代替がいないということで、長いことそれをずるずる続けてしまった。

教育と研究が本務のはずの人間がこれではいかにも情けない。そういう切羽詰まった情念にせきたてられて、ずいぶんと晩年になってから、晩節穢すまじとばかり一念発起し、植物を相手に放射線生物学の研究を始めた。その分野の外国書を翻訳した経験はあるものの、なにぶん若い時代からの研究上の蓄積というものがまったくないも同然だったので、実績らしい実績も残さずじまいだったが、ほとんど自力で、すなわち周囲の〝雑音〟に惑わされることなくこの

学問を学んでいく過程で強く感じるようになったのは、世間で誰一人知らぬ人とてない「放射能」という用語が、人口にあまねく膾炙（かいしゃ）しているわりには、意味内容が曖昧なままに使われている、という現実だった。その明白かつ冷厳な証拠を次に示す。

教える方でも放射線生物学を店開きしていた。「人間生物学」という、数百人もの学生が押しかけてくることもある教養科目の授業を、毎期教員が交代しながら担当していた。当番が回ってきたときは、「放射線と人間」という題目の講義をしたが、授業を始めるに先立って、人の口の端によくのぼるこの用語について若い世代が何を感じ、どう理解しているかを知っておこうと、学生に対してしばしばアンケート調査を実施した。質問は、

(1)「放射能」という言葉を耳にしたときどのようなことを感じますか、

(2)「放射能」をどのような〝もの〟（あえて〝実体〟とはしなかった）と理解していますか、である。さらに、

(3)X線検査を受けるとき、どんなことを感じますか、を付け加えたこともある。

対象には、物理や化学の基礎知識、いや専門知識をさえ身につけているはずの、れっきとした理工系の学生もあった。だが、彼らの回答も、世間的な理解をほとんど超えていなかった。さまざまな答えを拾いあげると、

(1)怖い、原爆、戦争、チェルノブイリ、人類の破滅……、

(2)空間をふわふわ飛ぶ得体の知れないもの、捉えどころのないもの、子供を作れなくするもの、異常な子供を作らせるもの……(いざ質問されると答えようがない、理解してないことがわかった、などという答えもあった)、

(3)健康を守ってくれるもの(ただし、医師や検査技師にX線照射室への立ち入りについて注意を受け、恐怖を覚えたというのがあった)、

となる。とりわけ、多くの学生が「放射能」について何かを感じとってはいるが、その実際の意味を会得していないこと、X線が危険な放射線の一種であるという事実を認識していないものも多いことを、はっきり示してくれた。

また、授業終了後にこんな題でレポートを書いてもらったこともある。「原子力発電などの原子力産業(核兵器の製造・使用や、研究におけるラジオアイソトープの利用を含めて考えてもよい)が、人類の現在と将来に対してもたらすかもしれない影響の評価から、政治的立場も絡んで対立するいろいろな意見があるが、このことについて、『現在と未来の人間(人類)の健康と資質の保持』という純粋に放射線生物学的角度から論議しなさい(エネルギー問題などの経済問題やイデオロギーの絡んだ政治問題は含めないこと)」。

原発問題の原点は、「現在と未来の人間(人類)の健康と資質の保持」にこそあるはずであ

る。だが、この問題を「純粋に放射線生物学的角度」から議論することは、けっして容易なことではないらしい。授業中に知ったさまざまなことがらがむしろ妨げになってか、いざ理詰めで考えることを迫られると、なるほどむずかしい問題であると悟ったろうほとんどの学生は、結局のところ健康や資質の問題から離れ、評価の対象として考慮しない、とわざわざ断った領域での議論に足を踏み外してしまうのである。はるか昔の学生時代に水爆実験反対の署名運動のさいに、生半可な知識で〝放射能〟なるものの怖さを市井の人たちに説いた蛮勇が今、小恥ずかしく思い出される。

二　東海村臨界事故が教えてくれたこと

被曝したのは放射能？　それとも放射線？

一九九九年九月三〇日、私たちの記憶にまだ新しい原子力関係の事件が、原子力施設の集中する東海村で発生した（あえて事故といわずに事件としたのは、それなりの理由があってのことである）。それから数カ月、連日の新聞紙上において、この事件に関する記事は、ほとんど途絶えることがなかった。私を驚かせたのは、一人の作業員が一六〜二〇シーベルトという度外れた高線量の放射線を浴びながら、八八日間という、これもまた、過去の知見からは考えられな

いほどの長い期間の、筆舌に尽くしがたい闘病の末に帰らぬ人となったことだった。六〜一〇シーベルトを被曝したもう一人の作業員も、長期に及ぶ加療の甲斐なく、二一二日後に亡くなった。

犠牲者を悼む心情は人後に落ちるものではない。聞くところによると、犠牲者は、これほど危険な作業に従事していながら、臨界という物理現象についての基礎知識すら教えられていなかったという。知識不足が根因となった操作ミスによる事件である（チェルノブイリの場合と違って、建物もその内部の設備も破壊されなかった東海村の件は、事故というより、人のおざなりな行為が引き起こした出来事、すなわち事件と呼んだ方が当たっているようにも思われる）。

——事故（あるいは事件）はなぜ起こったのか、
——事故の内容はどういうものか、
——臨界とは何か、中性子線とは何か、
——作業員の治療はどのようになされているのか、
——周辺住民は、どの程度被曝し、将来の健康はどうなるか、
——一般国民の健康は大丈夫か、子供にミルクを呑ませてもよいのか、
——責任はどこにあるのか、
——今後の原子力行政をどうすべきか、補償問題はどうなるか、

など、取り上げられた問題はたくさんあった。

しかし、一般市民の最大の関心事は自分の健康と生活に対する影響にこそあったはずである。これらすべての質問の中核・中心部にどっかり構えているのが、「放射能」という途轍（とてつ）もなく重い三文字である。それは、私がかつて行ったアンケートに対する答え——「放射能」は怖いという感覚や、原爆、戦争、チェルノブイリ、人類の破滅などへの危惧と、心の深奥でかたく結合している。

ごく最近、たまたま書店で求めた池上彰『日本語の「大疑問」』（講談社＋α新書）の中にこんな文章を見出した。「……この事故で放射線と放射能の違いがわからない人も多かったようですが、落ちついて漢字を見ると、『放射線』を出す能力が『放射能』なのですね。漢字の表意性が生かされていたのですが」「この放射線は放射状に飛び出していくものなので、この名前がつきました、つまり、あらゆる方向へ飛び出して行くのです」。著者はこれらの言葉の曖昧さを感じ、その原点に立ち返った。また、「被曝」が「被爆」と誤用されていることにも言及した。

著者はその職業がら、このような用語の解説を求められることもしばしばあったのだろう。著者が指摘する通り、放射線と放射能の違いを十分理解していない人が多いのである。実は、先程のアンケート(2)の答えとして私が学生に期待したのは、「放射線」を出す能力が「放射能」

であり、放射能には実体はない、というたったそれだけの文章だったのだが、直截簡明にこう記述してくれた学生はなかった。放射能とは、かのマリー・キュリーの、現在でも生きている古典的な定義によれば、原子が放射線を放出する性質・能力であって、何らかの実体ではない。化学者山縣登氏は、『放射能』（講談社ブルーバックス）という本の中で両者の違いを、ホタルを引き合いに出して要領よくこう説明している。ホタルがもっている光を出す性質が放射能、そして光が放射線です、と。

いくつかの報道機関はこの事変を「放射能事故」という形でとりあげた。そのような記事でいつも気になるのは、見出しに踊っている〝放射能〟が本文の中ではいつの間にやら「放射性物質」に化けたり、記事によっては〝放射能〟という言葉を本文中ではまったく使わずに済ませているものさえ見受けられることだ。「放射能測定器」と「放射線測定器」、「放射能障害」と「放射線障害」、「放射能漏れ」と「放射線漏れ」はどこが違うのかの説明があまりないまま使われている。

ところが、今回の記事では日が経つにつれて放射能という用語の使用頻度が減り、放射線という用語が増えていった。これは、この被曝が「放射能」ではなく「放射線」によっていることに気づいて、「放射能被曝」を使用することに違和感が出てきたためなのか。事実、事故が発生した建物は、テレビの映像や新聞の写真で見る限りまったく損壊していない。だから〝放

射能〟（この言葉が、次に述べるように、放射性物質の同義語として使われていることに注意！）が建物から周辺に飛び出す危険性はほとんどなかったはずだ。だとすると、建物の外域にまで影響を及ぼしたのは、その壁を通り抜けることのできる、きわめて透過力の大きい、〝放射能〟ではないある実体ということになる。こうして、この実体が放射線（主に中性子線）であることが認識されるようになったのである。すなわちこの事件は、放射線と放射能を同義語として扱うことの、さらには次に述べるように、放射能を放射性物質の同義語とすることの誤りを教えてくれる恰好の材料になった。

放射能、放射性物質、放射性核種……

この齟齬（そご）を弁解するかのように、やがて放射線障害に関する解説記事が出始めた。ある新聞の解説ではその冒頭に、「放射線と放射能の違い」が置かれた。いわく、「放射線を出す物質が放射性物質だ。放射性物質のことを放射能とよぶこともあるが、これは（この主語が何を指すかが不明確だが、文脈からは「放射能」を指していると考えるしかない）放射線を出す能力をもつ物質の意味だ……」（傍線筆者）と。傍線を付した部分こそ、わが国が放射能という用語を曖昧に使用してきた歴史の如実な反映である。

かつて、ある著名な専門家の書いた書物の中に、次のような文章を見出したことがある。

「……この値をはずれた原子核は不安定になり、いろいろな放射線を出して余分なエネルギーをはき出し、安定な原子核に変わります。このような変化を原子核の崩壊と呼んでいます。また、この放射線がいわゆる放射能にあたるわけです」(傍線は引用者による)。前半のしっかりした説明とは何とも裏腹の、放射線を放射能に当たるものとした後段の突慳貪(つっけんどん)で曰(いわ)くありげな〝定義づけ〟がいたく目に止まった。

また、別の本でこんな解説を目にしたこともある。「内部被曝の危険度を評価するときは、放射線をどれくらい浴びたかだけではなく、どのような放射性物質が体内に入ったか、放射能がどの臓器に蓄積されたかを、考えることが大切です。核種によって、人体に及ぼす影響や体内での振る舞いに違いが有るからです」「放射能が一度、体内に取り込まれると、ある決まった器官に濃縮して蓄積されるといわれます」「たとえば、ヨウ素131は喉にある甲状腺にたまり、甲状腺ガンを引き起こします。セシウム137は筋肉に吸着されやすく、肉腫を起こします。ストロンチウム90は骨に蓄積され、骨ガンの原因となります。プルトニウム239は呼吸とともに肺に吸い込まれると、かなり高い確率で肺ガンを引き起こします。これらの核種の性質が体に欠かせない栄養素とよく似ているため、危険な放射能とは気づかずに取り入れてしまうのです」(傍線は引用者による)。

後半部の内部被曝障害に関する叙述の一部に見られる、不十分な資料にもとづく断定的な表

現や、用語の無理解・乱用からくる不適切な説明はさて置いて、さしあたり傍線箇所について、①無造作に繁用されている〝放射能〟はすべて「放射性物質」と同じものである、②「放射線」「核種」と上記二つの用語の関係がはっきりしない、という二点を指摘しよう。

以下に①の理由を記す（②については第三章参照）。

チェルノブイリ事故のおり、住民が放射能を浴びた、そこから日本に放射能が飛んできた、という言い回しによく接した。しかし、マリー・キュリーが与えた放射能の本来の定義からすると、人体が物質の「能力や性質」を浴びたり、それらが移動したり、洩れたりするという表現は滑稽なのである。なぜなら、存在の場所を変えうるのは、物質の能力や性質ではなく、実体のある物質そのものだからである。ほとんどわが国でだけといってもよいが、放射能を暗黙のうちに、また無意識に放射性物質と同一視してしまう風潮がいつの間にか、あまり異論も出されないまま定着してしまった。特に第二次世界大戦後のことになるが、わが国では原爆による惨禍が放射能によってもたらされた、という言い方がしばしばなされ、放射能に物質的実体の意味が暗示的に付加されて、この言葉が原爆被災国日本の土壌にしっかり根をおろすに至った。さらに、この言葉の乱用は、放射能（radioactivity）を放射線（radiation）と同じものとしてしまう傾向さえ生んだ。

このように、日常よく使われ、また耳目にする〝放射能〟は、放射線を放出する性質をもっ

た物質、すなわち放射性物質（radioactive substance あるいは material）をも、この物質が放出する放射線をも意味し、恐怖や危機感を煽るのに簡便で好都合な言葉として誤用されてきたのである。ちなみに学術用語としての radioactivity に radioactive substance の意味まで含めて使用しているような文章を、注意して読んだ外国の文献の中に私はこれまで見出したことがない。この用語が「放射性」と訳されていたら、このような脱線は回避できただろう。

三　用語「放射能」の正しい使い方と間違った使い方

ここで、用語「放射能」の正しい使い方と誤った使い方とをまとめておこう。この先の話が円滑に進められるよう（用語上の齟齬をきたさないよう）に、またその使用が世間に無理解や誤解を招かないように、である。

「放射能」とは、マリー・キュリーによる本来の定義をもとにその後の原子物理学の知識を加味して表現するなら、「原子核がその不安定な状態を克服するために過剰のエネルギーを放射線の形で放出する能力や性質、さらには現象」のことである。

この用語はその後、「この能力の強さ、すなわち放射性核種の数量（後述するように目方ではない）」を表すものとしても使用されるようになったが、これには問題がない。放射能が強い、

高い放射能という表現はなりたつ。ちなみに酵素化学の分野ではしばしば用いられるものに酵素活性（enzyme activity）という用語があるが、これは、酵素の作用能力という意味である。したがって、「酵素活性を測定する」という表現は自然である。

　ところが、わが国では巷間で（そして一部の専門家によってさえ）、放射能が「放射性物質」を〝暗示する〟用語として用いられるようになった。放射能はある実体を示す概念ではないので、これは正しくない。放射能の放出・飛来・拡散、放射能の被曝、放射能による人類の絶滅、放射能の後遺症といった表現はおかしい。先述の酵素についていうと、活性の移動、といった表現はしない。普通の国語辞典や理化学辞典に徹底的に当たって、放射能を放射性物質の同義語、としているものには金輪際お目にかかれないことを、とくとご確認いただきたい。

　同じ言葉の繰り返しを避けるという〝文学的配慮〟から、放射能という用語と放射性物質という用語とを無定義のまま同義語として混用するのは、科学的事象の厳密な記述を妨げるだけでなく、生体にとって本当に怖い実体についての人々の認識や理解を誤らせる。

　さらに困った誤用は、放射能＝放射線とする扱いである。「放射線測定器」が〝放射能測定器〟、「放射線障害」が〝放射能障害〟のように呼ばれることがしばしばある。しかし、複数種類の放射性物質を含んでいることもある一試料中の〝放射能〟（放射性物質）を簡単な操作で定量できるような、持ち運びのできる単品の〝放射能測定器〟というものは存在しない。測定さ

れるのは、放射線の量であるから、「放射線測定器」である。また、このあと述べるように、放射線源には、放射性物質の他に各種の放射線発生装置があるが、放射線発生装置から放出される放射線は放射能とはまったく無関係なので、装置起源のX線その他の放射線に被曝して発生する障害は、〝放射能障害〟とは言えない。「放射線障害」である。

肝要なことは、人体や人類にとって危険なのは「性質や量」としての放射能ではなく、放射性物質から放出され、物質を変化（電離や励起）させうるだけの高いエネルギーを担って飛行し、生体物質に作用してそれを損傷できる放射線という実体である、ということである。

本書の叙述は、以上の諸点に十分配慮してなされている。放射線生物学は〝放射能の怖さ〟を研究目的にしている学問と考える向きもあろうが、この学問領域には、放射能という用語は、それ本来の意味で使われる場合以外は、ほとんど姿を現さない。使う必要がないし、やたらに使うことができないのである。それなしでも、〝放射能〟の怖さは、十分説明できる。そのわけをしっかり把握しないと、放射線障害がどのような機構で起こるか、も理解しにくい。

次のような簡明だが重要な関係を、このあとの叙述から正しく理解していただきたい。

放射能≠放射性物質（放射性化合物＞放射性同位体〔ＲＩ〕＞放射性核種）≠放射線（放射線源）

第二章　人類と放射線のつき合い

人類と放射線のつき合いが始まってからまだ一世紀しか経過していない。この間に人類は、この放射線をめぐってさまざまな経験をした。本章では、その足取りをごく大雑把に垣間みることにしよう（なお、本章の叙述の中には、あらかじめ説明を必要とする用語がかなり使用されている。それらの用語の意味などについては、必要に応じて次の第三章の記述からご理解いただきたい。また、本書の内容については、巻末の付表をご利用いただける）。

一　放射線の発見と放射線源の開発の歴史

偶然の発見——X線と自然放射能

放射線生物学は二〇世紀に、より正確には一九世紀の最後の数年間にその第一歩を踏み出した。そのきっかけは、X線というそれまで知られていなかった放射線の発見と、それに続いてなされた、放射能をもつラジウムなどの放射線源（三七ページ）の発見だった（傍線箇所の表現に注目していただきたい）。

一八九五年の末、ドイツのヴュルツブルク大学のヴィルヘルム・コンラート・レントゲン（一八四五〜一九二三）は、ちょっとした偶然が契機になって人体を透過し骨の形を発(あば)き出す未知の放射線に遭遇し、それをX線と名づけた。その翌年、フランスの物理学者アンリ・ベクレル（一八五二〜一九〇八）は、すでに発見・分離されていた元素ウランが、X線とは異なった未記載の放射線を放つ能力、つまり自然放射能をもっているという事実を、これまた偶然の機会に発見した。これら二つの発見は偶然がきっかけとなって達成されたもので、しばしば科学史上の話題とされる。ベクレルに続いて、フランス人ピエル・キュリー（一八五九〜一九〇六）とポーランド生まれのその妻マリー・キュリー（一八六七〜一九三四）は一八九八年、ピッチブレンド（瀝青(れきせい)ウラン鉱）という鉱物の中に放射線を放出する新しい元素ラジウムおよびポロニウムを発見し、それから数年かけて、ラジウムを塩化ラジウムの結晶として純化することに成功し、原子が放射線を放出する性質を放射能と呼んだ。ラジウムやポロニウムなど天然にきわめて希薄な濃度で存在していて安全であった天然放射線源は、人類の手によって濃縮されるに及び、危険な〝人工の〟放射線源と化したのである（今日原子力発電に使用される濃縮ウランもそのようなものと見なせる）。

したがって、一九世紀末から二〇世紀初頭にかけて、日常のレベルを超えて人類が接触した放射線は、器械から放出されたX線の他に、放射能をもった原子から放出される放射線（α(アルファ)

線・β（ベータ）線・γ（ガンマ）線）だけだった。

人工放射能の発見

時代は次の世代に移って、二〇世紀の三〇年代となる。世紀の変わり目の大発見の時代以降、二〇世紀の物理学は、原子核にいろいろな衝撃を与えてそれを破壊し、その構造を解きあかす段階に入っていた。

これから述べる発見もまったく予期せずに達成されたものである。その重みは、自然放射能の発見のそれを凌駕するといっても過言ではない。なぜなら、天然に存在する放射能をもつ同位体（同位元素）は六〇種ほどに過ぎないのに、人類が自らの手で造出した人工の放射性同位体は、今日ゆうに四桁の数字に達しているからである。その源流を辿ると、ピエル・キュリーとマリー・キュリー夫妻の次女イレーヌ・キュリー（一八九七〜一九五六）とその夫ジョリオ・キュリー（一九〇〇〜五八）が偶然なしとげた発見に到達する。一九三四年のことだった。この夫妻が行った実験とは、どのようなものだったか。「放射能」という言葉の意味を理解してもらういい現象なので、やや長い解説を入れよう。

実験の当初の目的は、アルミニウムの同位体の一つアルミニウム27の原子核にポロニウムから放出されるα線をぶつけてそれを破壊しようというものだった。だが、実験を終えて放射線

源として用いたポロニウムを取り去ったとき、偶然、予期しない現象に夫妻は遭遇した。本来は放射線を放出しない、つまり放射能をもたない被照射体から、線源撤去後もある種の放射線が一定時間、放出され続けたのである。すなわち、人間の手によって放射能をもつ元素が史上初めて作られたのだ。言い換えれば、自然界に見られる自然放射能のような現象が、人間の手で引き起こされたのである。つまりは人工放射能の発見だった。

その後の知見によれば、この現象は次のような機構で起こった。アルミニウム27にα線をぶつけると、それが原子核の中に取り込まれ、入れ代わりに中性子が一個放出されて、リン30が生成するが、このリン30はその原子核が不安定なためその内部に陽電子が生成し、それを放出して安定な（放射能をもたない）ケイ素30に変化した。放射線として検出されたのはこの陽電子線だった。リン30は、人類が造った人工放射線源の一つだった。

加速器と原子炉

同じ三〇年代に別の人工放射線源が登場した。加速器である。一九三一年、アメリカの物理学者ローレンス（一九〇一～五八、日本への原爆投下を推進し、水爆製造にも加担した）は、サイクロトロンという、荷電粒子（特に陽子）を加速して二〇〇〇万電子ボルトという高エネルギーの陽子線を作り出す装置を建造した。これを皮切りに、その後シンクロサイクロトロンやべ

バトロンなどのさまざまな加速器が造られ、人類の手で、空間を高速度で飛行する電子線・陽子線・重陽子線などの放射線が得られ、こうして人類が接触する放射線のリストにこれらの放射線がつけ加えられた。加速器は、これらの放射線を発生させる放射線源である。

さらに中性子線を発生させる放射線源である原子炉が続いた。一九三八年にハーンとシュトラスマンは、天然核種ウラン235が中性子を吸収すると、二〜三個の核分裂破片、二個の中性子およびエネルギーを放出するという核分裂反応を発見した。ここで発生した中性子が原料物質のウラン235に作用すれば、この反応は連鎖反応として進行する。原子炉を建造したのは、この核分裂連鎖反応を発見したイタリア生まれのアメリカの物理学者フェルミ（一九〇一〜五四、ローレンスらとともに原爆製造に参加）らである。一九四二年のことだった。

ちなみに、この連鎖反応を、制御された一定の割合で（臨界状態で）継続させる装置が原子炉であり、制御されない核エネルギーの瞬間的解放手段が核兵器である。もし、制御された状態が失われると、その場で放出されるγ線の他に、放出されたエネルギーの大部分が核分裂破片に運動エネルギーを与えてそれを遠方まで飛ばし、この破片の成分となっている放射性核種が放射線源となってさまざまな放射線を放つことになろう。

こうして人類は一九三〇年から四〇年代にかけて、加速器と原子炉（法律で放射線発生装置と呼ばれている機器・設備・施設）を建造することによって、電子線・陽子線・重陽子線・中性

子線などの放射線をも手に入れるに至った。

二　拡大する人体への影響

レントゲンがX線を発見した一八九五年以前に人類が浴びていた放射線は、すべて天然起源の放射線源からのものに限られていた。すなわち、今日いう自然放射線（バックグラウンド放射線）のみで、体外からは宇宙線と地殻の放射性物質が放出する放射線を、体内では放射性核種（例えばカリウム40）が出す放射線を浴びていた。これらの放射線の線量はほぼ一定で、かつ人類の世代継続にとって何ら問題になる量ではなかった、と考えられる。

ところが、X線の登場は、人類と放射線とのつき合い関係を一変させた。初めの頃こそ、X線が人体内部を透視する検査手段としてだけでなく、胸部ガンや鼻背（ハナスジ）の皮膚ガン、さらには痣（あざ）の治療に成果をあげたこともあった。だが、それが乱用されるようになって、例えば美容技術として脱毛に使われるなど、一般人も接触する機会が生じた。その後の時期にも、胸腺肥大患者（胸腺リンパ体質）・強直性脊椎炎患者のような患者にX線照射による治療が施され、その影響が後年に問題になった。

X線発見の翌年には早くも皮膚の紅斑・皮膚炎・脱毛が観察されており（ピエル・キュリー

とベクレルは、それぞれラジウムとウランを用いて自らの体を張って行った実験で潰瘍にかかった)、さらに一九〇二年にはX線照射による皮膚ガンが認められた(この皮膚ガンに関しては一九一四年まで一一四件の症例が報告された)。皮膚障害だけでなく、睾丸(こうがん)や造血組織の障害、不妊や発生異常も認識された。とりわけ犠牲者を多く出したのは、その職業がらX線を慢性的に浴びた医師・技師・看護婦である(九三ページ参照)。一九三四年になっても、放射線医学の学会で、指・手・下腕・上腕を手術で切断した医師たちの姿が多数認められたという。

放射性物質の扱いも当初は杜撰(ずさん)だった。キュリー夫妻が得た標品は、先述のように、天然の希薄な状態の放射性物質を高度に濃縮して得た放射線源であることを考えると、一種の人工線源と見なすこともできるものだった。万病に対して効験あらたか、という宣伝からラジウム水を飲用することが流行した。ある婦人はトリウムX(ラジウム224)の過剰注射によって死亡したが、これは、体内被曝による急性死の数少ない例である。マリー・キュリーの名は、慢性の体内被曝による犠牲者として記憶されているし、舌先で筆をなめながら時計の文字盤にラジウムを塗布した女工の悲劇(一〇三ページ)も思い出される。体内診断のために、トロトラストという放射性のX線造影剤が利用されたこともあった(一〇四ページ)。

さらに、一九四〇年代には、加速器と原子炉によって、放射性核種を人工的に製造、調達する道が開かれ、人類が手にしうる放射性物質の種類と量が激増した。これらの物質は今日、密

封線源として、あるいは開封線源（五三ページ参照）として医学・工学・農学・理学などの広い分野で研究や実際面に利用されている。例えば、生体内における物質の変化の道筋を調べるときに、放射性核種を目印として入れた標識化合物の使用が、生化学に対して、究極的にはわれわれの健康維持に対して果たした大きな貢献をけっして忘れてはならない。さらに、ガンの治療に用いられるコバルト60の放射線の役割も思い出される。

このように人工放射性核種という放射線源が発生する放射線への接触は、放射線作業に従事する職業人のみでなく一般人にも及んでいる。そのため被曝管理の問題に新たな局面が生じ、それに呼応して関連法規が整備され、強化されつつある、というのが現況である。

一九五〇年代以降に成立した核医学（一二〇ページ参照）は、それまで蓄積されてきた臨床上の十分な経験と放射線生物学の成果に支えられて、放射性核種を人体に対し安全に使用する医療技術として、また学問として発展しつつある。

右記のような放射線障害を防止するための国際的管理体制は、一九五〇年に正式に発足した国際放射線防護委員会（ＩＣＲＰ＝International Commission on Radiological Protection）に始まる。今日まで数次にわたって勧告を発表し、職業人の被曝管理にとどまらず、一般公衆のそれに対しても、被曝規制を一貫して強化する方向に動いてきた、といえよう。

現代人はどのような放射線を日常において浴びているだろうか。これについては第六章を参

照していただきたい。

三　放射線の利用と放射線生物学の課題

放射線生物学は、電離放射線（三一ページ）のエネルギーが生体分子に吸収されてから、何らかの影響（効果）が細胞・組織・器官・個体さらには後続世代に現れるまでの過程を研究する学問であるが、これは二〇世紀に入ってから登場した学問であり、生物学のすべての領域はいうまでもなく、核物理学から医学全般に及ぶ数多（あまた）の関連科学分野の協力を得て成り立つ広域科学である。放射線生物学の過去の成果の集大成ともいうべき大著を一九六一年に世に送ったバックとアレキサンダーは、この学問を「多数の個眼から構成される昆虫の複眼」に譬（たと）えた。放射線生物学は、生物学そのものと同等の広がりをもっている。

その目的の一つは、電離放射線の使用によって人類にもたらされるかもしれない放射線障害を予防し、止むなく発生した場合はそれを治療する、という現実的要請に応えることである。

放射線の量を便宜的に、低、中、高のレベルに分け、各レベルにおける数多くの実際の使用例のほんの一部を、生物学や医学の分野に限って紹介しよう。線量レベルの「低」は人間の健康にとってマイナスの影響がない程度のもの（むしろプラスの刺激効果をもたらす例もある）、

「中」は人間に各種の健康障害をはっきり引き起こす程度のもの、そして「高」は人の生死に係わる危険量、というように考えていただいてよい。

低レベル線量の利用は、低線量放射線の刺激効果を利用するもので、その詳細は第十一章を参照いただきたい。この効果はガンの治療にも利用されている。リンパ系組織のガンが全身に散らばる悪性リンパ腫の治療にあたって、患者の全身にあらかじめ〇・一グレイ（自然放射線の四〇倍程度）の放射線照射を週に二回の頻度で八〜一〇週続けたのち、三・五〜四グレイの放射線を患部に局所的に照射する療法で、きわめて高い治癒効果があげられている。これは、低線量照射が患者の免疫力を高めて、生体が高線量照射による免疫能の低下に抵抗できるように働くためだろうと考えられている。

中レベル線量の利用例として、有害昆虫を絶滅させた例がある。アメリカでウシに病気を引き起こすハエを駆除するために、次のような方法が採用されて成果をあげた。すなわち、このハエを人工的に大量に飼育し、ハエ自体は殺さないが、不妊にしてしまう程度の線量の放射線を照射してから飛行機で野外に放つのである。そうすると、これらのハエ（オスのハエ）と交尾した野外のメスのハエが産んだ卵からは子バエが発生できない。

これよりも高い線量の利用は、細菌などの細胞を死滅させるもので、放射線殺菌として知られているが、わが国ではまだ認められていない。

第三章　放射線と放射線源

放射線が生体系に影響を及ぼすときに、この舞台に〝三人の役者〟が登場する。放射線、生体系、そして放射線源である。「放射線源」という役者はそう有名ではないが、その役回りをあらかじめ説明しておかないと、この先の内容を十分に理解してもらえそうにない。そこで本章では、放射線と放射線源を中心に据え、折りにふれてこれらの役者と生体という役者の共演を描きながら話を進めることにしよう。

一　電離放射線とは

電離放射線の定義

空間を高速度で伝わるエネルギーの流れを「放射線」という。この定義は、日常私たちが接する光（可視光線）、電波、赤外線、紫外線がすべて放射線であることを意味する。放射線が空間を飛行できるのは、その実体が運動エネルギーを担っているからに他ならない。このエネルギーを使い果たし、飛行媒質中に停止した状態の実体は、もはや放射線ではない。

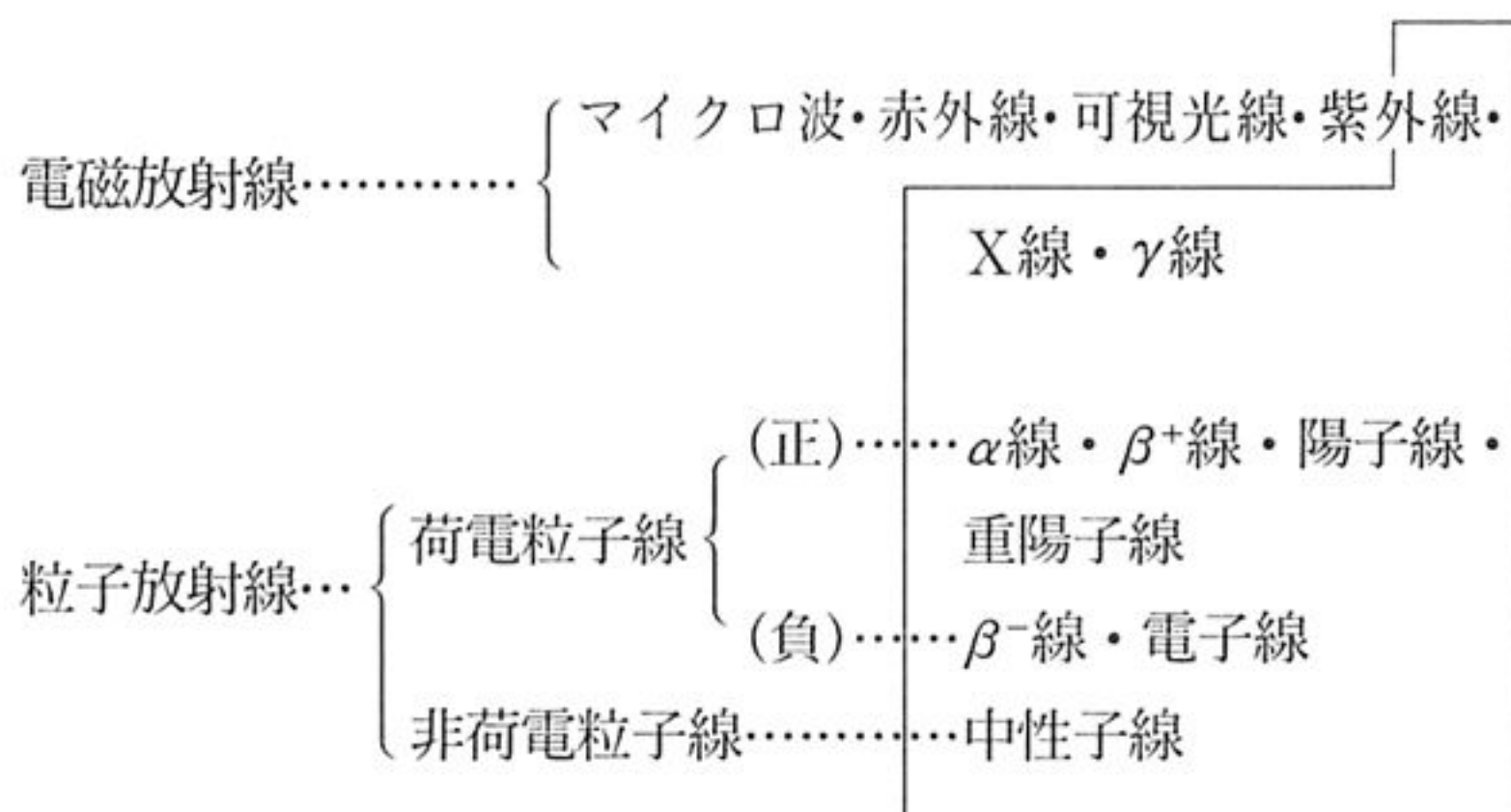



図3－1　電離放射線の分類

しかし、放射線生物学で対象とされる、あるいは『放射線障害防止法』が規定する放射線は、この実体が物質に電離（イオン化）を引き起こしうるだけの高いエネルギーを備えている。それらは「電離放射線」と呼ばれるもので、図3－1の囲みの中の放射線がこれに相当する。

電離放射線の大まかな分類

電離放射線は、電磁波に属する電磁放射線と、それ以外の粒子放射線とに分けられる。

〈電磁放射線〉

電磁波（放射ともいう。古くは輻射（ふくしゃ）と呼ばれた）は、粒子であり、かつ波であるという性質をもっている。それらのうち波長が短く、すなわち振動数が多く、一量子（電磁波の粒子性の面を表現するさいに用いる。光量子や光子ともいう）あたりのエネルギーの高いX線とγ（ガンマ）線とが電離放射線である。両者の違いは波長にではなく、その

発生の機構にある（四六ページ）。波長がさらに長い通常の紫外線は、電離放射線に含まれない。ただし、波長のうんと短い方の真空紫外線には電離能力がある。電離能力を有する電磁波を、単に放射線と呼ぶことがある。

〈粒子放射線〉

　これには荷電粒子線と非荷電粒子線がある。荷電粒子線の中で負荷電を有するのは、放射性核種の原子核から放出されるマイナスβ（ベータ）線と、それと本質的には同一であるが、放射線発生装置から出される電子線である。正荷電をもつ放射線には、α（アルファ）線、プラスβ線、陽子線、重陽子線、さらに各種の重いイオンの高速の流れなどがある。一方、非荷電粒子線に属するのが中性子線である。中性子線は、生体にとってもっとも危険な放射線であることを強調しておこう。これらの放射線の性質の詳細については、本章四で改めて述べる。

電離放射線に共通する性質

〈電離の意味と機構〉

　電磁放射線は一量子当たり、また粒子放射線は一粒子当たり高いエネルギーをもっており、物質を電離＝イオン化することができる。すなわち、正荷電粒子線は負荷電の軌道電子を原子の外に引き出し、負荷電粒子線はそれを追い出すことによって、中性の原子を陽イオンに変え

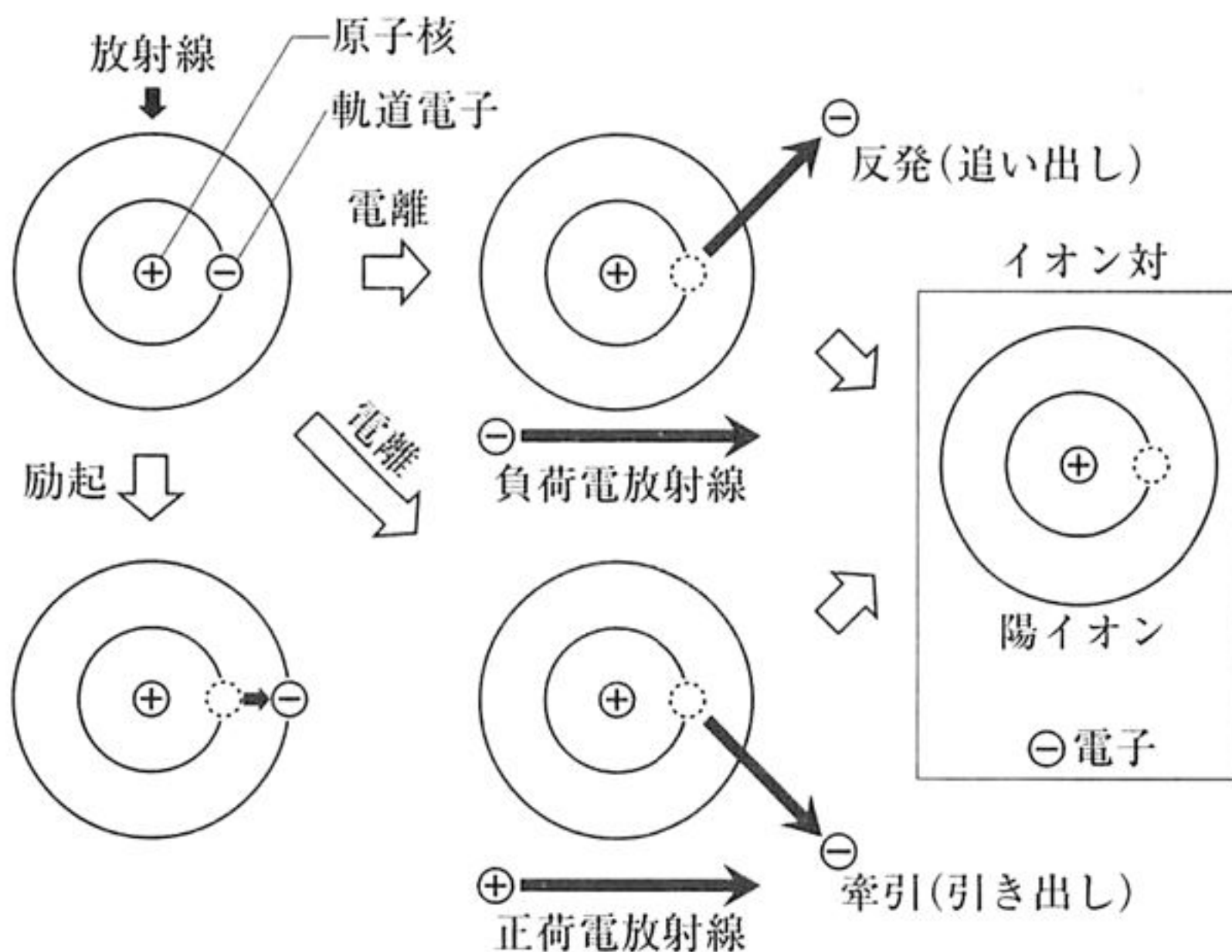



図３－２　電離と励起の機構

る、という共通の能力を有する。この能力を電離能、この現象を電離作用（図３－２）と呼ぶ。こうしてできる陽イオンと原子外に出た電子とがイオン対を形成する。静電気的牽引力によって正荷電の原子核に緊縛されている負荷電の電子を、この力を断ち切って原子外に解放するには、それに打ち勝つだけのエネルギーを軌道電子に付与することが必要であるが、電離放射線はこの要件を充たしているのである。ただし遅い中性子線のように、エネルギーがきわめて低いながら電離能力を有する電離放射線もある（五〇ページ）。

〈電離と励起〉

放射線は軌道電子を原子から完全に引き離せるとは限らない。エネルギーレベルの低い軌道電子（原子核により近く位置する電子）を

高いレベルに持ちあげるにとどまる場合もある。これを励起と呼ぶ（図3－2）。電磁波の中で波長がX線やγ線よりは長く、したがって一量子当たりの運動エネルギーの小さい紫外線が軌道電子に対して及ぼしうる作用は、励起にとどまる。ただし、先述のように、紫外線の中で実験室レベルでのみ生成する高エネルギーの真空紫外線には、電離能がある。

〈直接的電離と間接的電離〉

荷電粒子線による電離では、荷電粒子そのものが直接の電離因子になりうるが、電磁放射線と中性子線による電離は、間接的な機構で起こる。電磁放射線の場合は、その作用で原子から放出された電子（光電子やコンプトン電子など）が電離因子となる。中性子線の電離機構はきわめて複雑で、それについては後に述べる（四九ページ）。

電離放射線の指標

電離放射線の人体への影響を考えるさい、以下の項目についておおよその知識を整理しておくと役にたつことも多い（表3－1）。

(1)本体——「量子や粒子の高速の流れ」が電離放射線の本体である。末尾に「線」を付し、○○線などと呼ぶことが肝要である。例えば単に「中性子は怖い」では意味をなさない。「(エネルギーを担った）中性子線は怖い」が正しい表現である。なぜなら、生体重量のほぼ半分を

表３－１　各種電離放射線の諸性質

本体		電荷	質量（陽子=1）	エネルギー（MeV）	波長（nm）	線源
γ線	光子の高速の流れ	0	0	0.1～10^{2}	10^{-8}～10^{-2}	RI
X線	〃　〃	0	0	10^{-5}～1	10^{-3}～10^{2}	RI・装置
真空紫外線	〃　〃	0	0	6.2～12.4×10^{-5}	1～2×10^{2}	装置
α線	ヘリウム原子核の〃	+2	4	ほぼ4～7		RI
β^{+}線	陽電子の〃	+1	1/1840	5以下		RI
β^{-}線	陰電子の〃	−1	1/1840	概ね～2		RI
電子線	〃　〃	−1	1/1840	多様		装置
陽子線	陽子の　〃	+1	1	多様		装置
中性子線	中性子の　〃	0	1.02	多様		装置

MeV：100万電子ボルト，nm：10^{-9}メートル，RI：放射性同位体

占めている中性子は、生体にとって何ら危険な存在ではないからである。静止状態にある中性子はもはや放射線ではない。

(2)電荷（荷電ともいう）――この値が大きい放射線ほど媒質中の物質と電気的に相互作用しやすく、したがって飛行距離が短くなる。

(3)質量――質量の大きい放射線ほど、〝図体が大きい〟ため、飛びにくくなる。

(4)エネルギー――放射線のエネルギーは電子ボルト（eV）で表わされる。一電子ボルトとは、一個の電子が一ボルトの電位差で加速される場合に受けとるエネルギーのことである。ちなみに、しばしば見受けるメガ電子ボルト（MeV）は一〇〇万電子ボルトに相当する。いうまでもなく、同一の放射線ではエネルギーの大きいものほど飛行距離は増大する。電磁波では波長の短いものほど、

すなわち振動数の多いものほど、エネルギーは大きい。
以上の(2)〜(4)を総括すると、放射線の透過力、あるいは飛行距離は、ごく大まかにいうと、エネルギーに比例し質量および電荷に反比例することがわかる。このことを念頭に置けば、ある放射線を操作しているさい、被曝を避けるために放射線の発生源（放射線源）からの距離をどの程度とれば被曝を軽減できるかの判断も可能となろう。
(5)線源——これについては次の第二項でとりあげる。

二　放射線はどこから出るか——放射線源

放射線を発生する実体を放射線源、あるいは簡単に線源という。わが国には放射線の取り扱いを規制する『放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律』という法律があるが、この法律の名称に現れている「等」は、放射性同位元素とは異なる対象を指している。それは放射線発生装置のことである。つまり、放射線の発生源には、放射性同位元素（放射性同位体＝ラジオアイソトープ〔ＲＩ〕）と放射線発生装置の二つのタイプがある、ということだ。
〈放射線発生装置〉
装置とは人間が作った器械である。放射線を発生させることを目的にして作られた装置が放

射線発生装置である。その例として線加速器（直線加速器＝リニアック）、円形加速器（シンクロトロン、シンクロサイクロトロン、ベータトロンなど）、Ｘ線発生装置、原子炉（リアクター）などの名称をよく耳にする。フランスとスイスの国境に跨（また）がって建造された、直径が東京の山手線ほどもある巨大な加速器ＣＥＲＮ（セルン）や、あまりにも費用がかかりすぎることから建造中に中止（一九九三年）となったアメリカのＳＳＣも、放射線発生装置である。発生装置では、電子線・陽子線・重陽子線・Ｘ線・中性子線など各種の放射線が生産される。

〈放射性核種あるいは放射性同位体〉

もう一つの放射線源である放射性核種あるいは放射性同位体（放射性同位元素）の詳細については次ページ以下でとりあげる。放射性の（＝放射能を有する）同位体には、天然に存在するものよりも、人間の手で作り出されたものの方がはるかに多いことを強調する必要があろう。

放射性同位体から放出される放射線には、原子核の内部から放出されるものと、原子核外部の電子軌道が発生源となっているものとがある。前者はギリシア語のアルファベットで呼ばれ、α線・β線・γ線がこのような原子核起源の放射線である。一方、後者に属するのが特性Ｘ線である（四七ページ参照）。

三　放射性核種と放射性同位体

核種と同位体

核種と同位体の違いから始めよう。Xを任意の元素記号として、その左上に小記号A、そして左下に小記号Zの付いた$^{A}_{Z}X$という標記を目にすることがよくある。Aは質量数といい、原子核を構成する陽子の数と中性子の数の和である。一方、Zは原子番号で、原子核の中の陽子の数に等しい。中性の原子では、原子核外部の軌道電子の数でもある。

質量数Aから原子番号Zを差し引いた値が中性子の数になることは、容易にわかる。したがって、ある元素についてAが与えられさえすれば、その原子核の構成（陽子の数と中性子の数）を知ることが可能になる。核種とは、固有のZとAによって特定される原子核の種類のことである。核種は、ただ一種類しかない。例えば、質量数Aが一四である炭素14（^{14}C）についていえば、炭素の原子番号Zは六であるから、陽子数は同じ六、そして一四から六を引いた八が中性子の数となる。

ところが、同一元素でも中性子の数は同じとは限らない。このようにZが互いに同じで、Aを互いに異にする原子群を同位体（以前は同位元素と呼んだ）という。「同位」とは、同じ元素という意味である。任意の元素は、人工のものを含めて複数個の同位体をもつのが普通である。

表３－２　各種の放射性核種の特性

核種	原子番号	放出放射線	エネルギー（100万電子ボルト）α	β〔最大〕	γ	半減期
^{3}H	1	β^-	―	0.0186	―	12.33年
^{14}C	6	β^-	―	0.1560	―	5730年
^{13}N	7	β^+ EC**	―	1.198	***	9.965分
^{15}O	8	β^+ EC**	―	1.732	***	2.037分
^{24}Na	11	β^- γ	―	1.393	1.369, 2.754他	14.92時
^{30}P	15	β^+ EC**	―	3.210	***	2.498分
^{32}P	15	β^-	―	1.711	―	14.26日
^{35}S	16	β^-	―	0.167	―	87.51日
^{40}K*	19	β^- EC**	―	1.312	1.461	1.277×10^{9}年
^{45}Ca	20	β^-	―	0.257	―	162.6日
^{59}Fe	26	β^- γ	―	0.465他	1.099他	44.50日
^{60}Co	27	β^- γ	―	0.318他	1.173, 1.333	5.271年
^{90}Sr	38	β^-	―	0.546	―	28.74年
^{90}Y	39	β^-	―	2.280	―	64.10時
^{131}I	53	β^- γ	―	0.606他	0.364他	8.021日
^{137}Cs	55	β^- γ	―	0.514他	0.662他	30.04年
^{222}Rn*	86	α γ	5.490他	―	0.510	3.824日
^{226}Ra*	88	α γ	4.784他	―	0.186他	1600年
^{235}U*	92	α γ	4.398他	―	0.186他	7.038×10^{8}年
^{238}Pu	94	α γ	5.456, 5.499他	―	0.0435他	87.7年
炭素Cの場合						
^{11}C	6	β^+ EC**	―	0.960	***	20.39分
^{12}C	6	安定	―	―	―	
^{13}C	6	安定	―	―	―	
^{14}C	6	β^-	―	0.1560	―	5730年

＊天然に存在する放射性核種．＊＊軌道電子捕獲（electron capture, 44ページ）．＊＊＊陽電子線の陽電子消滅（48ページ）により51.1万電子ボルトのγ線が生成．H 水素，C 炭素，N 窒素，O 酸素，Na ナトリウム，P リン，S イオウ，K カリウム，Ca カルシウム，Fe 鉄，Co コバルト，Sr ストロンチウム，Y イットリウム，I ヨウ素，Cs セシウム，Rn ラドン，Ra ラジウム，U ウラン，Pu プルトニウム（『アイソトープ手帳』日本アイソトープ協会〔2001〕による）

例えば炭素には、炭素11、炭素12、炭素13、炭素14などがあるが、一つ一つがただ一種しかない核種であり、これらの四種が相互に同位体である（表３－２）。このように標記された場合の数字は、陽子の数（六個）と中性子の数との和を示す。これらの同位体のうち炭素12および炭素13は安定で（すなわち放射能をもたず）、自然界に本来存在し、炭素12が九九％以上を占めている。一方、炭素11および炭素14は不安定、つまり放射能をもっている。炭素14は、宇宙線の中性子線が大気中の窒素と反応してわずかながら形成されるが、炭素11とともに人工の同位体である（四四ページ参照）。

すでに第一章で述べたように、原子核が放射線を放出する性質を放射能と呼ぶ。核種の中で放射能を有するものを放射性核種、同位体の中で放射能を有するものを放射性同位体（radio-isotope）、略してＲＩという。同位体と同様、放射性同位体も、同一元素に複数個存在していることが多い。

簡単にいうと、同位体はある同一元素に属する原子の種類を、核種は原子核の種類を示す用語である。放射性同位体も放射性核種も、放射性物質すなわち放射線源である。本書では放射性同位体（ＲＩ）と放射性核種とを放射線源として区別せずに用いている箇所もあるが、厳密には以上のような違いがある。

放射性核種の崩壊

原子核から放射線が放出されるのは、それが不安定なためである。不安定であるということは、過剰の（余分の）エネルギーを有していることを意味する。このような原子核は、過剰エネルギーの全部あるいは一部を、エネルギーを担った放射線の形で放出し、他の核種に変わって安定化しようとする。この現象を崩壊あるいは壊変という。

原子核が不安定である（エネルギー過剰状態にある）、すなわちそれが崩壊するのは、原子核内における陽子数と中性子数とのアンバランスのためである。崩壊は、外部の要因に左右されず、個々の放射性核種ごとに一定の速度で行われる。この速度は、現存の原子数が半減するまでの時間、すなわち物理的半減期で示される。

放射性核種が放射線を放出する形式を、崩壊形式という。これにはα崩壊、β崩壊、γ崩壊がある。

〈α崩壊〉

α崩壊ではヘリウム４の原子核（陽子二個と中性子二個よりなる）の高速の流れであるα線が放出される。その結果、元の放射性核種の原子番号が二、質量数が四減少する。例えば、かつてその取り扱いによって晩発性の骨障害を引き起こしたラジウム226は、α線を放出して崩壊すると、原子番号が二だけ小さいラドン222に転換する。

α線は、原子番号の大きな元素の放射性核種から出される。α線が単独で放出されることは少なく、通常、α線に伴ってγ線が放出される。

α線を出す核種から、α線に随伴してβ線が放出されることは滅多にない。ラジウム226は、連続する崩壊ののちに安定な鉛206に転換するが、ラジウム226そのものから放出されるのはα線とγ線であって、見かけ上検出されるβ線は、崩壊途上に現れる別の核種が放出する。

α線のエネルギーは、四〇〇万電子ボルトから七〇〇万電子ボルトの範囲にあり、この範囲を外れるものは、通常の「放射性同位体表」には見当たらない。同一核種から出てくるα粒子はすべて同一のエネルギーをもっている。

〈β崩壊〉

β崩壊には、陰電子を放出するマイナスβ崩壊、陽電子を放出するプラスβ崩壊、そして軌道電子捕獲の三種類がある。これらの崩壊では、質量数は変わらず、原子番号が一だけ増加または減少する。

陰電子は中性子過剰の原子核から放出される。そのさい原子核内部では、中性子が陽子と陰電子に転換して原子番号が一だけ増加し、陰電子がマイナスβ線として原子核から飛び出す。

陽電子は、陽子過剰の原子核から放出される。そのさい原子核内部では、陽子が中性子と陽電子に転換して原子番号が一だけ減少し、陽電子がプラスβ線として放出される。

先述の炭素の放射性核種の場合（四一ページ）、炭素14はマイナスβ崩壊をして原子番号七の窒素14に、炭素11はプラスβ崩壊の結果、原子番号五のホウ素11にそれぞれ転換する。

軌道電子捕獲では、原子核にいちばん近いK軌道の電子が原子核に捕らえられ、核の陽子が電子と反応して中性子に変わるため原子番号が一だけ減少し、一方、空になった電子軌道に、よりエネルギーレベルの高い外側の電子が移行し、その差に相当するエネルギーが電磁波（固有X線）の形で放出される。この形式のβ崩壊は、生体内にも存在する天然の放射性核種カリウム40に見られ、原子番号が一つ小さいアルゴン40に変わる（一一八ページ参照）。

いずれの形式のβ崩壊でも、質量がほとんどゼロで電荷をもたない中性微子（ニュートリノ）が原子核から放出される（なお、中性微子の質量の有無は、現代物理学の大きな課題となっている）。β崩壊は、原子番号の大小には関係なく起こる。β線だけを出す放射性核種は、原子番号の小さい一部の元素に見られる。水素3（トリチウム）、炭素14、リン32、イオウ35、カルシウム45などで、これらの核種は生物学の研究によく使用される。しかし、多くの放射性核種では、β線に伴ってγ線も放出される（表3－2）。

β線のエネルギー、すなわち原子核から飛び出してくる電子がもっているエネルギーは、概ね二〇〇万電子ボルト以下と見てよい。ただし、同一核種から放出されるβ線のエネルギーは、放出される個々のβ粒子ごとに異なっている。これは、崩壊で放出されるエネルギーがβ粒子

と中性微子との間にアト・ランダムに配分されるためである。したがってエネルギーとβ粒子数の関係をグラフに描くと、山型の連続した曲線となる。最右端のβ粒子が最大のエネルギーを、山の頂点のβ粒子が平均のエネルギーをもっている。最大のエネルギーの三分の一が平均のエネルギーである。普通は最大エネルギーが記載されるが、平均エネルギーが記載されている文献もあるので、注意を必要とする。

〈γ崩壊〉

γ崩壊では、原子核が波長のきわめて短い電磁波（γ線）を出して低いエネルギー状態に遷移する。質量数や原子番号は変化しない。

γ線は、α崩壊およびβ崩壊に伴って放出されることが多い。これらの崩壊によってなおも放出しきれなかった余分のエネルギーが、γ線の形で〝絞り出される〟、と考えるとよい。

γ線の単独放出は、核異性体変移と呼ばれる現象で見られる。例えば、今日医学の検査で頻繁に使用されているテクネチウム99m（^{99m}Tc, mはmetastable〔準安定〕の意味、原子番号四三）は非常に弱いエネルギーのγ線を出し、しかも半減期は六・〇一時間ときわめて短い。テクネチウムは、原子番号九二のウランまでの元素の中で、唯一つ天然に存在しないとされていて、人間が造り出した元素である。

γ線のエネルギーは放射性核種ごとに多様である。治療に用いられるコバルト60は、崩壊の

半減期が比較的長く（五・二七一年）、弱いβ線とともに、一一七万および一三三万電子ボルトの二本のγ線を放出する。これらのγ線はガン細胞を体外照射によって殺すのに用いられる。

四　放射線の性質

放射線の種類には、右記のα線、β線、γ線、固有X線などの他に、マイナスβ線と同じ陰電子の流れである電子線、別のタイプのX線、さらには陽子線・重陽子線・中性子線なども ある。これらの放射線の諸性質と、それらの取り扱い上肝要なことがらを簡単に述べよう。

電磁放射線

電磁波の中で電離放射線に属するのは、もっとも低波長域、すなわち高振動数域に位置するX線ならびにγ線である。質量（静止質量）〇、電荷〇で、物質と相互作用しにくく、透過力がきわめて大きい。一量子当たりのエネルギーは、X線が一〇電子ボルト～一〇〇万電子ボルト（1MeV）、γ線が一〇万電子ボルト（100 keV）～一億電子ボルト（100MeV）である。

X線の低波長域とγ線の高波長域とは、波長でもエネルギー範囲でも重なっているが、このことはX線とγ線とがエネルギーや波長の違いから区別されるのではないことを示している。

すなわち、X線は原子核外から、γ線は原子核からそれぞれ放出される電磁波である。X線には固有X線（または特性X線）と、制動X線（または連続X線）の二種類がある。固有X線は、先述（四四ページ）のように、軌道電子捕獲という現象で発生する。同じ核種から放出される固有X線は、すべて同一のエネルギーをもっている。一方、制動X線は、高エネルギーの電子が原子核の近傍を通過するときに減速され、減速前後のエネルギーの差に相当するエネルギーが電磁波となって放出された放射線である。固有X線とは異なり、エネルギーは斉一ではない。制動X線の発生防止は被曝管理上きわめて重要である。例えば、放射性核種リン32は高エネルギーのβ線を放出して制動X線を発生させやすいので、その保管には制動X線の発生しにくい、原子番号の小さな材質の容器（ガラス・プラスチック・アルミなど）を用いなければならない。

粒子線

〈荷電粒子線〉

α線は、ヘリウム原子核の高速の流れである。電荷がプラス二、質量数が四で、これらの数値からもわかるように、透過力がきわめて小さい。

陽子、すなわち水素の原子核の流れである陽子線と、重陽子、すなわち陽子と中性子をそれ

ぞれ一個ずつ含む粒子の流れである重陽子線は、放射線発生装置によって得られる。電荷はいずれもプラス一、質量数は一および二である。これらの放射線の透過力は、エネルギーが同程度のα線およびβ線と比べて、その質量からα線よりは大きく、β線には及ばないことが理解できよう。

マイナスβ線は、陰電子の高速の流れであり、マイナス一の電荷をもつ。質量は陽子の一八四〇分の一である。したがって、電荷と質量の両方の点で電磁波よりは飛行距離の短い(〝足が短い〟)放射線であることが理解できよう。

プラスβ線は、陽電子の高速の流れであり、プラス一の電荷をもち、質量は陰電子のそれに等しい。陽電子は陰電子と反応して二本のγ線に変わる。この現象を陽電子消滅という。プラスβ線を放出する核種を扱うさいは、このγ線からの被曝を低減する遮蔽が必要である。

電子線加速装置は、マイナスβ線と同じ陰電子の流れである電子線を作り出す放射線発生装置である。陰電子のエネルギーを、一〇万電子ボルトから、β線よりははるかに高い一億電子ボルトにまで設定することができる。高エネルギーのものほど透過力が大きいので、深部病巣の治療に用いることができる。本体はマイナスβ線と同じ陰電子の流れであるが、装置から出される電子線はβ線とはいわない。

〈非荷電粒子線――中性子線〉

電荷をもたない粒子線は中性子線である。中性子線は原子炉や中性子発生装置によって作られる。外部からエネルギーを与えなくても自然に核分裂を起こして中性子線を発生する人工放射性核種のカリフォルニウム252（原子番号九八）は、医療の現場で役立てられている。

中性子線が生体にとって危険度がもっとも高い放射線とされるわけを述べよう。三五ページで指摘したように、生体重量のほぼ半分を占める安定な中性子が怖いのではなく、運動エネルギーを担って飛行状態にある中性子線が怖いのである。

中性子線の怖さは、質量が陽子とほぼ同じでありながら、電気を帯びている陽子とは異なって電気的に中性であるために、ひとたび運動エネルギーを与えられると、負電荷の軌道電子と作用することなく原子核に到達できることに起因している。原子核とどのように反応するかは、中性子線のエネルギーによって異なってくる。

今、一〇〇万電子ボルト程度の速い中性子線が体外から生体に入射したとしよう。このような高いエネルギーの中性子線は、生体組織中の原子の原子核との間に弾性衝突という現象を引き起こす。そのさい、弾き飛ばされた原子核（反跳原子核）の流れと、この弾き飛ばしに使った分だけエネルギーを失った中性子線（散乱中性子線）とが生成する。生体の主要構成原子である水素と衝突した場合は、反跳原子核は陽子線となり、一方、散乱中性子線は、まだ残って

いるエネルギーを使ってさらに弾性衝突を繰り返す。すなわち、一〇〇万電子ボルトの中性子線は、生体細胞内の水素原子と一八回ほど衝突し、組織を散乱中性子線の形で走りながら陽子線を作り出していく。最後に、エネルギーをあとわずかしか残していない遅い中性子線となるが、これで〝悪業〟を終えるのではない。

　このような遅い中性子線は、原子核を弾き飛ばすことはもはやできず、原子核に捕まってしまう。相撲になぞらえるなら、突っ張って相手を土俵の外に突き飛ばすことはできず、逆に相手に組み止められてしまうようなものである。これは、中性子捕獲と呼ばれる現象である。そのさいいろいろな生体元素の原子核との間に原子核反応を起こす。すなわち、

　水素1との反応——中性子が原子核に捕らえられると水素1は水素2（重陽子）に転換し、そのさい原子核からγ線が飛び出してくる。

　窒素14との反応——中性子が原子核に捕獲されると、原子核から陽子線が放たれ、炭素14が生成する。

　リン31との反応——中性子が原子核に取り込まれる結果、リン32が生成し、そのさい原子核からγ線が飛び出してくる。

　生成した核種が放射能をもつに至るような反応を放射化反応と呼ぶ。すなわち、これらの核種から放出される放射線も、電離を引き起こす因子となる。右の場合は、炭素14とリン32は崩

壊してβ線を出すので、これも〝悪業〟に加担する。

このように中性子線を浴びた細胞内では、間接的に生成したγ線、陽子線、β線などのさまざまな放射線が飛び交うことになる。

肝要な点は、傍線を施した放射線がすべて「間接的に」電離に与るということである。臨界事故で高エネルギー中性子線を多量に浴びた作業員の体内では、このように多種類の放射線が二次的に生成し、それによって重い障害が引き起こされたものと考えられる。

なお、中性子線をガンの治療に用いる方法があるが、これはガン組織に選択的に集まるようなホウ素化合物を患者の体内に投与したのちに、患部に中性子線を局所照射してホウ素に中性子を捕獲させ、そのさい放出されるα線をガン組織の縮退に利用しようとするものである（一二〇ページ）。

中性子線を照射した試料は、放射化反応の結果、放射能を帯びている可能性があるので、通常の実験室ではなく、放射線管理区域内で扱わなければならない。ただし、γ線を照射しても放射性物質が生成することはないので、γ線照射試料は通常の実験室で扱うことができる。

第四章　生物面の基礎知識

一　線源と被曝の形——体外被曝と体内被曝

ある生体系が放射線を浴びたときに、その生体系にもたらされる何らかの変化を生物学的効果と呼ぶ。この効果は、生体系の活性が抑制される方向に現れる場合だけでなく、促進される方向に現れる場合もある。ここで主に扱うのは前者で、その効果は、分子のレベルでは損傷、そして細胞・組織・個体などの生体系のレベルでは障害という言葉で表現されている（促進的効果については第十一章参照）。

効果の起点は、生体系への放射線エネルギーの付与である。言葉を換えていえば、飛行する放射線の実体（電磁放射線の量子あるいは粒子放射線の粒子）がもつ運動エネルギーが生体系によって吸収されることである。このエネルギー付与あるいは吸収を、照射あるいは被曝と呼んでいる。わが国ではこの場合、人間がある目的をもって何らかの対象に放射線を浴びせるときは「照射」、そして人体が否応なく放射線を浴びるときは「被曝」と表現されている。被曝と照射をひっくるめて「曝射」「曝露」などという言い方がなされることもある。

被曝は放射線の発生源、すなわち放射線源（線源）と生体との位置関係から、体外被曝または外部被曝と、体内被曝または内部被曝とに分けられる。前者は線源が体外に位置する場合の被曝、そして後者はそれが体内に存在する場合の被曝である。容易に理解できるように、体内被曝は、体内に侵入できる線源である放射性物質(以下ＲＩと標記)によってしか起こりえない。

線源

線源は、⑴放射線発生装置、⑵密封ＲＩ、⑶非密封（開封）ＲＩの三つのタイプに分けられる。

〈使用状態〉

発生装置のうち巨大なものはほとんどすべて固定された状態にあるが、診療用移動バスに取り付けられたＸ線発生装置のように、移動可能なものもある。

密封ＲＩとは、法律では「正常な使用状態において開封または破損の恐れのないもの」と定義されており、ＲＩに直接手をふれることができないよう、あるいは放射線の強度を低減するよう、目的にかなった遮蔽物（カプセルなど）の内部に封入されており、空気を汚染する恐れはない。通常固定使用であるが、ラジウム針・ラジウム管のように患者の体内に挿入して使用する小線源は移動可能である（それゆえ紛失の危険を伴う）。コバルト60照射装置のように、固

定されていながら部分的に移動（回転）可能なものもある。
非密封ＲＩは開封線源とも呼ばれ、開封して使用するので空気中に飛散し、分子自体として、あるいはダスト（固形微粒子）やミスト（液状微粒子）として呼吸器官・消化器官・皮膚の傷口から体内に侵入し、あるいは体表面に付着する。管理がもっとも厄介な線源といえる。

〈起動〉

発生装置は、スイッチのオン・オフで人為的操作が可能である。
密封および非密封ＲＩからは常時放射線が発生しており、それを止めることはできない。

被曝

〈被曝の形〉

放射線発生装置で問題になるのは体外被曝のみで、その巨大さからしてそれが体内に入ること、すなわち体内被曝の原因になることはありえない。
密封ＲＩでも体外被曝だけが問題になる。小密封線源を誤って呑み込んだ場合は体内被曝の形になるが、この場合ＲＩを封入している容器が壊れたり、ＲＩが漏れ出したりするものでない限りは、ＲＩが生体組織とじかに接触することはない。
非密封ＲＩの場合は、体外被曝に加えて、体内被曝も問題になる。巷間できわめて曖昧に用

いられている〝放射線漏れ〟の危険は体外被曝の危険と、一方、〝放射能漏れ〟の危険は主に体内被曝の危険とそれぞれ関係している（ただしこれらの用語法は、放射能の定義〔第一章〕からして、けっして適切なものとはいいがたい）。

〈作業員の被曝防止〉

すべての線源の取り扱いにおいて、遮蔽を設ける、線源との距離を保つ、作業時間を短縮する、という原則を遵守することが必要である。発生装置は不使用時には電源を断つ。非密封ＲＩの使用にあたっては、空気中ＲＩ濃度の低減に努め、化粧・飲食は禁止とし、体表面を保護しなければならない。

〈環境・市民への影響〉

関連法規は管理区域（放射線源の取り扱いが法的に認められた場）内で放射線業務に従事する職業人の他に、管理区域外に居住する一般市民の障害発生の防止をも目的としている。

巨大な発生装置については不慮の事故以外、一般市民が被曝することは、まず考えにくい。

密封ＲＩのうち持ち運びの可能な小型の線源は、しばしば社会問題を引き起こす。杜撰な管理によって小線源が紛失した場合である。例えば、ある病院で治療目的で使用していたイリジウム密封線源が紛失し、それを拾得・着用した市民が被曝した事件、医療上のミスを犯した場合、密封線源を廃棄物業者が誤って解体した事件（一三〇ページ）など、この種の事件は、起

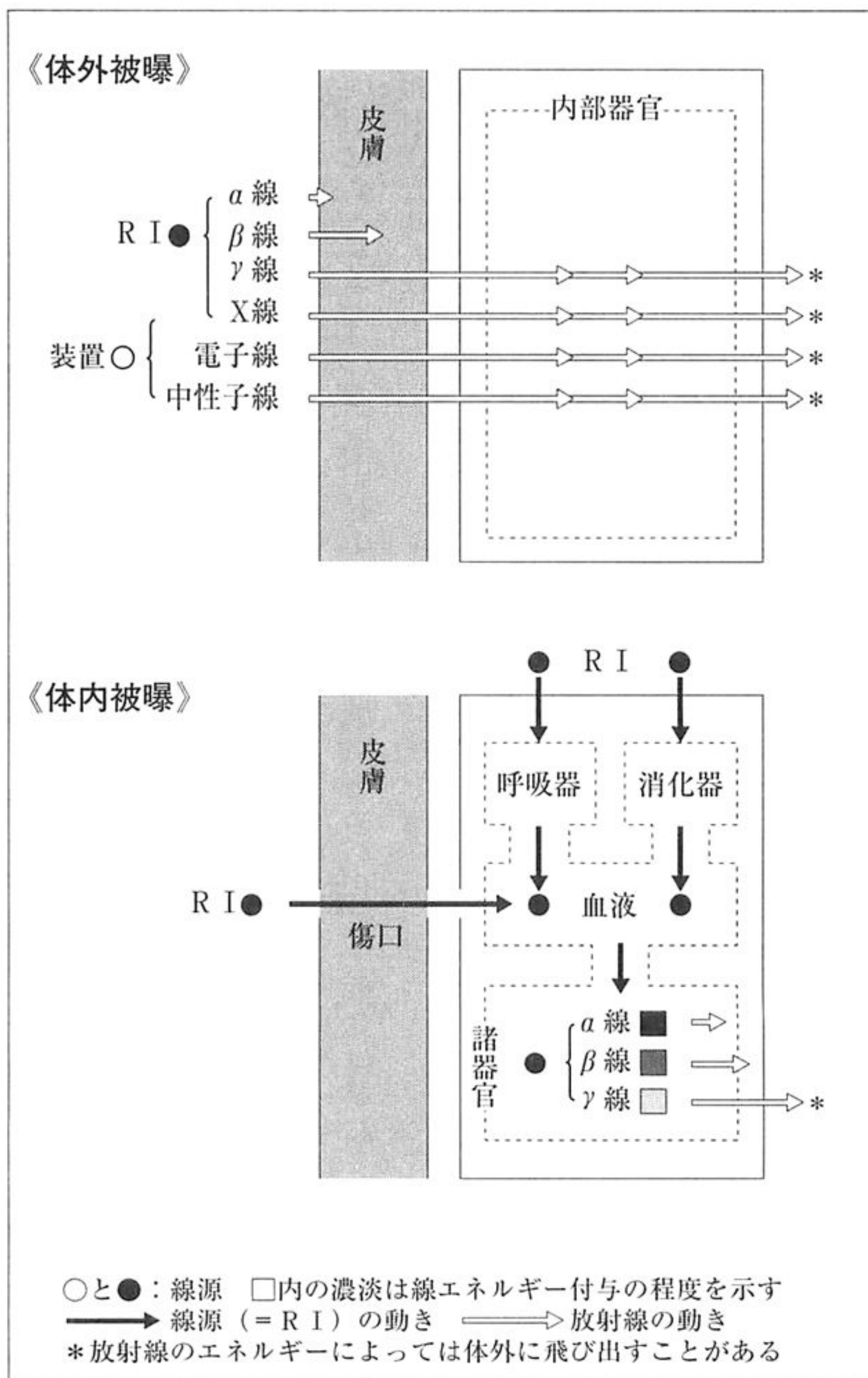



図４－１　体外被曝および体内被曝における線源と放射線の動き

こりえないとはいえない。

非密封ＲＩを使用する場合は、ＲＩを含む排水・排気が環境中を広い範囲にわたって移動する。右記のいわゆる〝放射能漏れ〟とは、量的規制を逸脱して、線源であるＲＩ分子が管理区域から環境中に漏出し、その中を移動・拡散する現象と見なせる。この点で同じ放射線源である発生装置および密封線源からの影響である〝放射線漏れ〟とは異なっている。

体外被曝で問題になる放射線

体外被曝で問題になる放射線について考えよう（図４－１上段、表４－１）。

体外被曝は、放射線発生装置であれ、ＲＩであれ、すべての放射線源から発せられるすべての種類の放射線によってもたらされる。

線源の位置からして放射線は人体の最外部を覆っている皮膚にまずあたる。その場合、エネルギーのすべてが皮膚によって吸収されてしまえば放射線が体の内部にまで入り込むことはないが、それが一部しか捕捉されない場合は、放射線が内部器官を侵すことになる。

皮膚の内部には胃腸や造血組織（骨髄）のように、皮膚以上に放射線感受性の高い器官が存在し、それらが生命の維持にとってより重要な役割を果たしているので、Ｘ線やγ線など透過力の高い放射線ほど危険となる。

表4－1　放射線の「透過力」

放射線	エネルギー (MeV)	透過力（センチ） 水中 (≒軟組織)	空気中
γ線	0.05～2.9	0.5～45	
X線	0.01～0.4	0.1～4	
中性子線	2.5×10^{-5}	0.28	
〃	10^{-3}～0.05	0.68	
〃	1	2.45	
〃	10	11.0	
^{14}C-β線	0.156	0.02	32
^{32}P-β線	1.711	0.92	610
^{210}Po-α線	5.304	4.5×10^{-4}	3.8
^{226}Ra-α線	4.784	4.0×10^{-4}	3.3
^{238}Pu-α線	5.456	4.3×10^{-4}	3.7

MeV：100万電子ボルト，C 炭素，P リン，Po ポロニウム，Ra ラジウム，Pu プルトニウム

すでに述べたように、放射線の透過力は、そのエネルギーに比例し、質量と電荷に反比例する。そして媒質の密度には反比例する。

まず、α線について見よう。表4－1に、さまざまなエネルギーの各種の放射線が空気中および水中でどの程度飛行するかを示してある。α線はRIによるエネルギーの違いはあまりなく、空気中なら三～四センチ飛ぶとそのエネルギーを使い果たし、媒質中に停止してしまう。

同一放射線において媒質中の飛行距離は、その密度が高いほど小さい。したがって、空気よりも密度の高い水の中では、飛んでいける距離は小さく、わずか〇・〇〇〇四センチ程度である。皮膚・脂肪組織・筋肉などの軟組織は、放射線を透過させる性質については水と同じように扱ってよいとされているので、α線は皮膚のほんの表層部で停止してしまう。したがって、α線を体外から浴びる場合は皮膚障害にとどまり、体内の器官が侵される心配はないと考えて

よい。しかし、ここで誤解を避けるために強調する必要があるのは、①α線を出すＲＩはほとんど例外なく透過力の高いγ線をも同時に放出するので、このようなＲＩの取り扱いにあたっては、γ線による体外被曝の危険を伴うこと、②次項でも述べるように、このことはあくまで体外被曝の場合であって、体内被曝では右にのべたようなα線の性質が逆に組織に対して〝濃厚な〟障害を与えること、である。これらの理由から、ラジウム、ウラン、プルトニウムなどの、いわゆるα放射体は、やはり恐ろしい元素である（後述）。

β線の場合はどうか。この放射線はα線よりは透過力が大きい。したがって、皮膚のかなり内部にまで侵入していける。ところが、β線のエネルギーはＲＩによって格差が大きく、水素3（トリチウム）とリン32を比べると、二桁ほど後者が高い。表4－1から、リン32から出るβ線は空気中を約六メートル、そして水中（軟組織中）をほぼ九ミリ飛んでいくことがわかる。このような高エネルギーのβ線は、目の水晶体を侵すおそれがあるので、その保護に心がける必要がある（保護用のメガネで十分である）。

その他の放射線、すなわち電磁放射線（Ｘ線とγ線）および放射線発生装置から出されるエネルギーの大きい速い中性子線・高エネルギー電子線・陽子線は、体の内部まで到達できる。その到達距離は、放射線の種類とエネルギーに関係し、体を突き抜けるものもある。β線が診療にあまり役立たないのに、同じ電子の流れである電子線が治療に使用されるのは、器械（装

表4－2　線エネルギー付与と比電離

放射線	エネルギー (MeV)	LET	SI
X線	0.2	2.6	80
〃	1.0	0.49	15
^{60}Co-γ線	1.173, 1.333	0.3	10
速中性子線	12	9.5	290
電子線	0.1	0.42	13
〃	3	0.2	6.3
^{222}Rn-α線	5.49	6120	3700

MeV：100万電子ボルト，LET：線エネルギー付与（Linear Energy Transfer［キロ電子ボルト/ミクロン］），SI：比電離（Specific Ionization［イオン対/ミクロン］），Co コバルト，Rn ラドン

置）を用いれば、高いエネルギーをもつ電子の流れを作り出せるからである。

以上のことを総合して、ＲＩから放出される放射線の体外被曝における危険度は、γ線＞β線＞α線の順になる。

体内被曝の場合

図4－1の下段と表4－2を見ていただこう。繰り返しになるが、体内被曝で問題になるのは、線源として体内に入りうる非密封のＲＩだけである。放射線のエネルギーは、まず皮膚によって吸収されるのではなく、皮膚を経由することなく内部器官の組織に直接移される。

体内被曝で考えねばならないのは、線エネルギー付与（ＬＥＴ）、あるいは比電離（ＳＩ）と呼ばれる放射線の指標である（表4－2）。電離放射線は、飛行中に媒質中の原子や分子と作用してそれらにエネルギーの一部を移し、それらを電離（イオン化）あるいは励起する。こうして放射線の通る道筋（飛跡）に沿ってイオン対が形成される。この作用は、エネルギーを

使い果たすまで続けられる。この場合、放射線の側からは飛程（放射線の飛ぶ距離）一ミクロン、すなわち一〇のマイナス四乗センチあたり喪失する（付与する）エネルギーを線エネルギー付与、また媒質の側からは同じ一ミクロンあたり形成されるイオン対の数を比電離という。

一イオン対の形成には、放射線の種類に関係なくほぼ三四電子ボルトのエネルギーが消費されるので、同一のエネルギーをもつ異種の放射線を比べた場合、飛行距離の小さい放射線ほど、すなわち短距離を飛ぶ間にそのエネルギーをすべて吐き出す放射線ほど、線エネルギー付与も比電離もより大きくなることが、容易にわかるだろう。言葉を換えていえば、このような放射線ほど、ある局所（例えば骨髄組織の細胞）に対してより大きな生物学的効果、すなわち障害をもたらす、ということである。そのような性質のもっとも際立っている放射線がα線で、速中性子線や陽子線もこの種の〝硬い〟放射線として扱われる。ただし、同一放射線でも、例えば、表4－2においてX線とγ線という電磁放射線に見られるように、エネルギーの小さいものほど飛行速度が落ちるので、単位距離あたり形成されるイオン対の数は多くなる。もう一点指摘する必要があるのは、表に掲げられた数字は、全飛程についての平均値であって、飛跡に沿った部分によってこの値は異なってくる、ということである。α線やβ線のような放射線では、速度が急速に落ちて消滅する飛行末端部分で残りのエネルギーを一気に放出し、イオン対密度のきわめて高い局所を作り出す。ところが、飛程、すなわち飛行末端のはっきりしない電磁

放射線ではこのような現象は起こらない。そこで、エネルギーが類似していても、体内被曝に関してはβ線はγ線よりも危険であると見なされる。

以上の説明から、RIから放出される放射線の体内被曝における危険度は、α線＞β線＞γ線の順となることが理解できよう。

体内被曝についてさらに二、三の知見をつけ加えよう。

①全身に分布するRIより、局所に集積される（濃縮される）RIがより危険である（これについては一〇二ページ参照）。

②法令ではα線を放出する核種は、高エネルギーのβ線を出すストロンチウム90とともに危険度のもっとも高い第一群に入れられているが、この第一群から第四群までに群分けする基準は、体内被曝の危険度の高低である。水素3や炭素14のような核種は、その物理的半減期が長いにもかかわらず、危険度のランクが一番下の第四群に入れられている（理由については九九ページ参照）。

③DNAや生体膜などの重要な生体分子や生体系に、水素3や炭素14などの放射性核種が取り込まれた場合は、それらが崩壊すれば異種の元素に転換し、こうして分子の性質が変化することもありうる。すなわち、マイナスβ崩壊して水素3（トリチウム（Tと標記される））はヘリウム3に、炭素14は窒素14にそれぞれ転換する。今、DNA分子中の塩基チミンのメチル基

（$-CH_3$）でその水素原子の一つが^3H（T）と置き換わっていたとしよう。それが崩壊したとすれば$-CH_2T$は$-CH_2He$に変わるが、ヘリウムは他の原子との間に化学結合を作ることができないので直ちに脱落し、残された部分が$-CH_2^+$というイオンになる。このイオン部分はOH^-が存在すると$-CH_2OH$に転換する。こうして、もとのＤＮＡがもっていた遺伝情報が変わる。

二　各種の量と単位

放射線関連の事故が起こると、新聞・雑誌・テレビなどに、あまり聞きなれないか、聞いたことがあっても理解しにくい単位で表される数値が賑やかに登場し、その数値がきわめて小さいものであっても、世間の人たちを「これはたいへんな事態だ」とつい思い込ませ、恐怖心を抱かせることがないとはいえない。ラド・グレイ、レム・シーベルト、キュリー・ベクレルなどの新旧の単位があり、しかもそれらの単位の前にはしばしば、極微から極大に至る数を表すための接頭辞（ピコ・ナノ・マイクロ・ミリ、キロ・メガ・ギガ・テラ・ペタ）が付くので厄介だ。

〔参考〕大きい方に⇩キロ（k）＝10^3、メガ（M）＝10^6、ギガ（G）＝10^9、テラ（T）＝10^{12}、ペタ（P）＝10^{15}

小さい方に⇩ミリ（m）＝10^{-3}、マイクロ（μ）＝10^{-6}、ナノ（n）＝10^{-9}、ピコ（p）＝10^{-12}

各種の量

各種の量には、線量・線量当量・ＲＩの量などがある。一九七五年の国際度量衡会議で国際単位系（ＳＩ系）の基本単位であるキログラム・メートル・秒を用いて放射線関連の各種の量を示すことが定められたために、これらの量は、この会議前に用いられていた旧単位でも、会議後に使用されるようになった新単位でも表されることがある。

線量とは、放射線の純粋に物理学的な量であり、放射線がその作用対象に対して及ぼす効果を定量的に言い表すさい、その原因となるものの量である。これには照射線量と吸収線量とがある。線量当量は、線質（放射線の種類とエネルギーによって定まる放射線の性質）の異なる放射線のヒトに対する影響の量的差を考慮に入れて評定される量であり、ヒトの被曝管理上の用語であって、他の生物に対しては用いない。

ＲＩの量は、単位時間当たりの崩壊原子数、つまり放射線を放出する能力で、いわゆる放射能である。物質の質量や放射線の線量ではないことに注意していただきたい。

線量

①照射線量

X線の発見者レントゲンにちなんで、最初に使用された線量単位である。単位はレントゲンで、記号R（小文字rを用いることもある）で示される。適用しうる放射線はX線およびγ線などの電磁放射線のみで、しかも対象は乾燥空気に限られる。一レントゲンとは、これらの電磁放射線を空気中で照射した場合、標準状態の乾燥空気一立方センチ（0.001293g）の中に一静電単位（esu）の正負のイオン対を生産するような放射線の量であり、新単位系に読み換えると、一キログラムの乾燥空気あたり 2.58×10^{-4} クーロンの電荷になる。しかし、レントゲン量は、照射された空気における電離密度を表す数値であって、電磁放射線のエネルギーによって、生体に吸収されるエネルギー量とは必ずしも簡単な比例関係をなさない。そのため両者の量を区別する必要から、次に述べる吸収線量が導入されるに至った。照射線量は、被曝管理上の問題を含め、生体系には今後使用しないことが望ましい、とされている。

②吸収線量

放射線が物質に作用するときそれにもたらされるエネルギーの吸収密度であり、レントゲンとは違い、すべての放射線、そしてヒトを含むすべての対象に適用される。

その単位はグレイ（Gy）で、一キログラムの物質による一ジュールのエネルギー吸収が一

グレイである。吸収線量は、古くはラド（rad）という単位で表されていたが、ラドとグレイの間には、一グレイ＝一〇〇ラドの関係がある。古い文献にあたっているさいにラドが出てきたら、「一ラドは一グレイの一〇〇分の一、あるいは一〇〇ラドが一グレイ」で対処できる。

③線量当量

これは、人体に対するさまざまな放射線の影響を評価する必要から設けられた量で、ヒトの被曝線量を問題にするときに限って使用される。それが必要なわけは次のようになる。生体系が線質（種類とエネルギーによって定まる放射線の性質）を異にする放射線から等しい量のエネルギーを受け取っても、その生物学的影響は必ずしも同じになるとは限らない。例えば、α線とγ線とが生体系に及ぼす影響は、ある組織が、これらの放射線のエネルギーをたとえ同一量（例えば同じ一グレイ）吸収したとしても、一般的に前者が後者よりずっと大きい。これは両者の線エネルギー付与あるいは電離密度が異なるためである（表４－２）。したがって、線質の異なる放射線の人体に及ぼす障害の程度を比較するには、吸収線量にある係数を掛けて得られる量で評価する必要がある。この量を線量当量といい、シーベルト（Sv）という単位で表す。この係数は線質係数（Quality factor, QF）と呼ばれる。すなわち線量当量（シーベルト）は、吸収線量（グレイ）に線質係数を掛けて得られる。

線質係数は、Ｘ線・γ線・β線に対して一、中性子線に対してはエネルギーの違いによって

表４－３　いろいろなシーベルト値

項目			値
自然放射線（世界の平均値）			2.4mSv／年
人体に含まれるカリウム40による体内被曝			0.33mSv／年
高度12,000メートル			5 μSv／時間 =1mSv／200時間
夜光時計			6 μSv／年*
X線検査	胸部（間接撮影）		0.5mSv／回*
	歯		3 mSv／回*
	胃		4 mSv／回*
	妊婦検診		13 mSv／回*
ヒトの急性被曝における致死線量			8～10Sv
〃 〃	半致死線量		3～4 Sv
何らかの臨床症状が現れる最小線量			250～500mSv
東海村臨界事故	敷地内作業者**	最大	48 mSv
	〃	227名の平均	4.9mSv
	周辺住民	最大	15 mSv
	大線量被曝者Ａ	（死亡）	16～20Sv
	〃 Ｂ	（死亡）	6～10Sv
	〃 Ｃ	（生存）	1～4.5Sv
職業人の年間被曝上限線量			50 mSv
一般人の年間被曝上限線量			1 mSv

Sv シーベルト，m ミリ，μマイクロ．＊記載値の１例．＊＊A～Cを除く

五～二〇、陽子線に五、α線と重荷電粒子線に二〇の値が与えられている。

古い文献によく出てくる旧単位レムとシーベルトとの間には一シーベルト＝一〇〇レムの関係がある。古い文献にあたっているさいにレムが出てきたら、「一レムは一シーベルトの一〇〇分の一、または一〇〇レムが一シーベルト」で対処すればよい。

やはり古い文献に見られるレントゲン値については、X線やγ線などの電磁放射線を軟組織が浴びた場合に限って、

一レントゲンをほぼ一ラド、すなわち一〇〇レントゲンをほぼ一グレイとしてよい。

表4－3に、いろいろなシーベルト値を拾い集めた。その中には、私たちの生活と関係のありそうな値も見られる。

例えば、高度一万メートル以上の上空を飛ぶ航空機に乗って頻繁に所用を果たしている人は、年間二〇〇時間の飛行時間中に一般人の年間被曝上限線量の一ミリシーベルトを浴びてしまう。その他の数字のあるものは、後に言及する機会がある。

④放射能

放射性核種（またはＲＩ）が放射線を放出する能力である放射能は、単位時間あたりの放射性核種の崩壊数で表す。単位はベクレル（Bq）で、一ベクレルとは一秒に一崩壊をもたらす放射性核種の量である。

旧単位はキュリー（Ci）で、一キュリーは、三七ギガベクレル（GBq）である。

繰り返すが、放射能とはＲＩの質量や放射線の線量ではない。また、この数値はＲＩという線源とのみ関係があり、放射線発生装置という線源とは無縁である。したがって、発生装置が放射線を造り出す能力を放射能とはいわない。

三　細胞の放射線感受性

ベルゴニエ・トリボンドーの法則

器官の放射線感受性は、それを構成している細胞の放射線感受性に左右される。この感受性について、Ｘ線が発見されてからまだ一〇年ぐらいしか経っていない一九〇六年に、フランスの放射線物理学者ベルゴニエとトリボンドーは、シロネズミの精巣に関する自分たちの研究と、別の材料を用いた他の研究者の研究を総括して三つの法則を一般化した。彼らの定式化した三つの法則のうちの二つは、今日でも受け入れられている。その骨子は、成体を構成する細胞の中で、増殖能が大きく、分化の程度の低いものほど、放射線感受性が高い（放射線障害を受けやすい）というものである。

例えば胚の細胞のように、増殖の速い、頻繁に分裂する細胞は、放射線に対して特に感受性が高く、一方、何らかの機能を果たすのに好都合なように分化（特殊化）してしまった細胞ではそれが低い。したがって、動物の場合、電離放射線によってもっとも障害を受けやすいのは、造血組織（骨髄やリンパ組織）、小腸上皮、皮膚表皮の基底層、精巣、眼の水晶体（レンズ体）など、細胞の分裂が一生続き、細胞が絶えず更新されているような部分である。

高等動物成体の細胞系と放射線感受性

同じ機能を果たす細胞の一群を細胞系あるいは細胞集団と呼ぶ。細胞系はその再生能力、すなわち細胞を更新して古い細胞を新しい細胞で置き換える能力いかんによって、次の三種類に分類される。

①再生系――右記の造血組織（骨髄やリンパ組織）・小腸上皮・皮膚・精巣・水晶体など。

②条件的再生系――肝臓・腎臓・脾臓（ひぞう）など。肝臓のように、その一部が剔出（てきしゅつ）されると、残りの組織の細胞が分裂を始め、剔出部を補塡（ほてん）するような系である。

③非再生系――末梢および中枢神経・骨格筋・心臓の筋肉などの細胞のように、完成した後は、もはや分裂しない細胞からなる系。

これらの細胞系の放射線感受性は、更新過程の有無から、再生系＞条件的再生系＞非再生系となろう。つまり、神経や筋肉は放射線障害を受けにくい細胞系である。

同一の再生系細胞集団にはさまざまな発生段階の細胞が見られるが、それらの放射線感受性は、右記のベルゴニエ・トリボンドーの法則によって、発生の早い順に、幹細胞（後述）＞芽（が）細胞（後述）＞機能細胞＞老化細胞となる。ただし、機能細胞であるリンパ球は例外で、きわめて感受性が高い。また、神経細胞は機能的には放射線に感じやすい。

細胞再生系では細胞の生成、分裂、分化、成熟、機能、死という過程が絶えず進行している。

このことを造血組織について説明しよう。

私たちの血液中を流れている各種の血液細胞は、それぞれ特定の働きをするのに好都合なように分化した機能細胞である。赤血球は酸素の運搬のために、血小板（栓球）は血液凝固のために、白血球は食作用（食菌作用）のために、そしてリンパ球は免疫作用のために、それぞれ特殊化しており、これらの細胞が分裂することはもうない。これらの細胞はどこで作られ、どのような過程を経て特殊化した細胞にまで発生したのか。それらの根源となる細胞、すなわち幹細胞は骨髄にあり、たえず分裂を繰り返している。それが分化して、まずそれぞれの血液細胞の元になるいくつかの種類の芽細胞に変わる。例えば、赤血球の芽細胞は原赤芽球、血小板のそれは巨核芽球である。リンパ球の元になるリンパ芽球はさらにリンパ組織（リンパ腺、脾臓、そして成人以前に存在する胸腺）の中で成熟する。原赤芽球の場合は細胞核を失い、ドーナツ状に変形した赤血球となって血液に入る。

このような正常な分化の過程に要する時間は、どの血液細胞でも四日であるが、血液中の寿命は細胞ごとに異なっており、赤血球では約一〇〇日、リンパ球はわずか一日（組織液中ではこれより長いとされる）である。

各種細胞の放射線感受性は、赤血球が完成するまでに現れる細胞についていえば、骨髄幹細胞＞原赤芽球（＞前赤芽球＞赤芽球）＞赤血球の順になる。かなりの量の放射線を全身に一回

で浴びた場合、感受性のもっとも高い骨髄の幹細胞がもっとも深刻なダメージを受ける。このダメージが細胞の分裂能力の回復を不可能にするほどのものであると、赤血球の供給が中断され、現在血管中を流れている赤血球がすべてその寿命を終えてしまえば、組織への酸素運搬が低下し、そのために体全体の症状の悪化が進むことにもなろう。一方、骨髄の障害が回復可能な程度であれば、いったん減少した血液中の赤血球の数がある時間ののちに復元し、病状は回復に向かう。その他の血液細胞、特にリンパ球や白血球の消長については、八九ページを参照いただきたい。

造血組織以外の各種の再生系における幹細胞は、腸上皮絨毛(じゅうもう)基底部の腺窩(せんか)の細胞(クリプト細胞)、皮膚の表皮下層部の基底細胞、精巣の細精管基底板の精原細胞、そして水晶体の赤道部の細胞などである。再生系における細胞生産は、例えば消化管上皮の細胞(絨毛)で見ると、一日に五六億個という厖大な数に達する。ヒトの寿命を七〇年とすると、その総数は一四三兆個になり、目方にすると六八五キログラム、つまり、体重七〇キロの人では一生の間に約一〇個体分の細胞が小腸の中に捨てられることになる。

幹細胞からできる機能細胞は、水晶体上皮が繊維に分化して水晶体内に保有されるのを別にすると、血液細胞は自己消化や脾臓での破壊によって、小腸絨毛の細胞は脱落によって、皮膚の角質層の細胞は剥離によって、そして精子は放出によって、いずれも体から消滅する。

四　確定的影響と確率的影響

放射線の影響（効果）

放射線が生体に引き起こす変化を、影響あるいは効果という。影響（効果）とは広義には次の二つの意味を併せもった用語である（「効果」は効き目という意味ではなく、「結果」といった意味合いである）。すなわち、通常の検診で発見でき、広義の医療の対象となるような放射線の影響である障害と、将来発生するかもしれない有害な影響（障害）の期待値、発生の頻度、確率、あるいはリスクとである。

線量と効果の間に見られる二種類の関係

放射線の線量と、それが生体系に及ぼす効果との関係を、線量-効果関係という。図４－２に示すように、二つの異なる線量-効果関係の存在することが、放射線生物学上、古くから知られていたが、国際放射線防護委員会（ＩＣＲＰ）は一九七七年、ヒトの被曝管理は両者を明確に区別して行う必要がある、と勧告した。この勧告を受けてわが国の関連法規が抜本的に改正された。その結果、従来用いられてきた「許容線量」という用語が消滅し、それに代わって「限度線量」が登場したことをまず指摘しておこう。

影響（重症度・頻度）
確率的影響
確定的影響
自然発生率
0
しきい線量
線　量

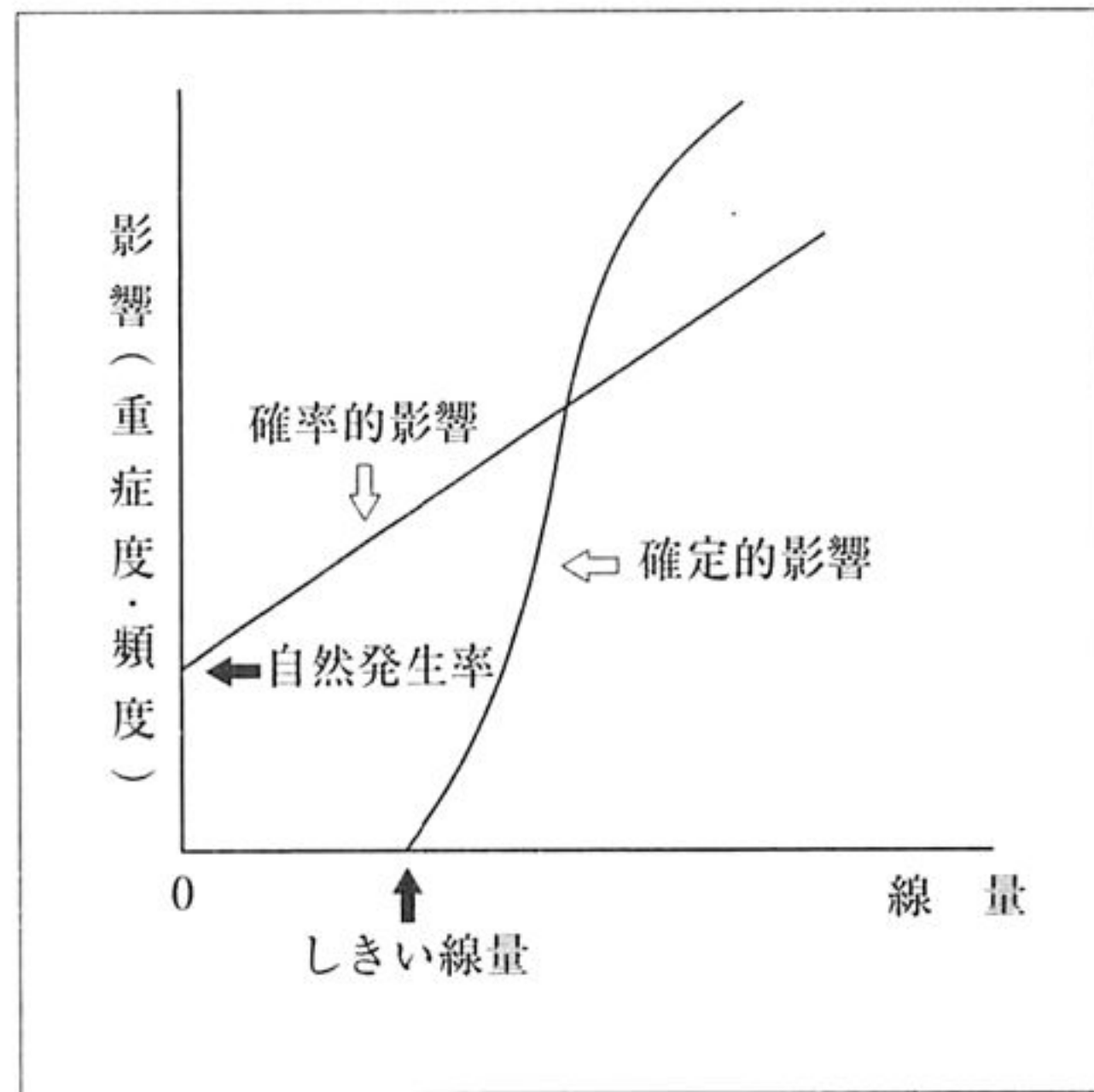



図４－２　線量と効果（影響）の関係

確定的（非確率的）影響と確率的影響

線量に依存する二つの影響の一つは、確定的（非確率的）影響、そしてもう一つは確率的影響と呼ばれている。

①確定的（非確率的）影響

これは発ガンを除くもろもろの身体的障害として現れる影響である。線量-効果の関係を示すグラフはS字型曲線となる。ただし、線量-効果の関係は単純なグラフになるとは限らない。

線量に比例するのは、障害の重症度である。例えば、皮膚障害は、放射線の量に応じて、発赤（ほっせき）→脱毛→爛れ（ただれ）→壊死（えし）のように、その重症度が増大する。

グラフは線量ゼロからではなく、ある線量値から立ち上がる。横軸を切るこの線量をしきい線量という。すなわち、線量がしきい値（閾値（いきち）ともいう）以下の領域では障害は現れない。こ

れは、比較的低い線量では生物の回復能により潜在的障害が克服されるためと考えられる。
したがって、線量をこの領域内の十分小さい側に採れば、許容しうる線量の設定が原理的には可能になる。旧法令における「許容線量」はこのような基本的考えにもとづいて設けられていた。

②確率的影響

ところが、発ガンと遺伝的影響について線量と効果との関係を示すグラフは、右のようなS字型曲線にはならずに、おおむね直線となる（図４―２）。

この場合、線量に比例するのは障害の大小ではなく、影響が現れる確率、つまり発生の頻度である。これはリスクという言葉でも言い表されている。

確定的影響とは異なり、線量ゼロのときこのグラフは縦軸と交わる。これは放射線とは無関係に生ずる自然発生の頻度である。そしてだいじなことは、放射線による発生頻度が、放射線の総線量に正比例して直線的に増加していく事実だ。このことは、どんな少線量の放射線を浴びても、自然発生のレベルを超えて何らかの影響が追加されること、そして一定線量を長時間にわたって受けようとも、短時間内で浴びようとも、結果は同じだ、ということである。つまり、総線量を時間で割って得られる線量率、すなわち時間のパラメーターとは無関係であること、さらに敷衍（ふえん）すれば確率的影響に回復、すなわちしきい値はないことを意味している（ただ

し、線量率に依存する突然変異の例も知られている)。重要な点は、これらの事実が許容しうる線量の設定を不可能にする、ということである。

放射線の上限線量をどう設定する？

ここで、以上の二つの「影響」が存在することを念頭に置いた場合、放射線の上限線量をどう設定したらよいか、という問題が出てくる。

旧法令で設定された許容線量は、確定的影響に見られる回復能力の存在に依拠するもので、確率的影響に回復がないことは考慮に入れていなかった。

ところが新法令では、被曝管理の重点がこの確率的影響に移された。そしてこの影響をもたらす線量を記述するために実効線量当量という用語が導入され、その上限が限度という言葉で呼ばれることになった。限度とは、放射線が人類の幸福に対してもたらす利益が、確率的影響による健康上の不利益をはるかに凌駕することを保証しうる上限の線量と理解される。一方、確定的影響の線量は組織線量当量であり、その場合も上限線量は許容線量ではなく、限度線量で表されることになった。

放射線を職業上扱う人たちの線量当量の年限度値は、実効線量当量限度が五〇ミリシーベルトと定められている。

一方、一般公衆の実効線量当量限度は、年間一ミリシーベルトとされている。後述（次章一〇六ページ）するように、確率的影響はある集団全体に発生するリスクとして扱われる。一ミリシーベルトという数字は、個々人にとっては自然放射線の線量にも及ばない数字であるが、集団全体の確率的影響の発生リスクは、集団全体の受けとる総線量に比例して増大するので、集団を構成する個々人が浴びる放射線の量を可能な限り低減しよう、というのが新しい被曝管理の根本的考えである。

しかし、現実の被曝管理にあたって、これらの線量を評定する合理的な方法は今日まだ確立されているとはいいがたい。

このようなＩＣＲＰの考えに対しては、①確率的とされる影響を示すグラフが、低線量領域では、放射線量に対して直線的に増加するとは限らない、つまりしきい線量が見られるような例もある、という知見（第十一章）や、②遺伝や発ガンに関与するＤＮＡが損傷を受けても、それを修復するさまざまな機構を細胞がもっている、すなわち、確率的とされる影響にも回復現象がある、という知見（第十章）から、異論も出されている。

なお、ＩＣＲＰの勧告が提出されるたびに、新しい研究成果にもとづいて、新しい考えや用語が導入されている。混乱を避けるため、本書での用語法は、一九七七年の勧告にもとづいて制定された現行法令におおむね従った。

第五章　放射線障害のあらまし

前章（七三ページ）では、放射線の影響を、通常の検診で発見でき、広義の医療の対象となるような障害と、将来発生するかもしれない有害な効果の期待値（発生の頻度、確率あるいはリスク）とに分けたが、本章ではこれら二つの影響を「放射線障害」として扱っている。

一　放射線障害総論

1　放射線障害の特徴

(1)放射線障害にだけ特有の症状というものはない。これを放射線障害の非特異性という。例えば、白血病は放射線被曝によってしばしば誘発される病気であるが、これ以外の原因によっても起こる。

(2)放射線障害は、放射線の線質に依存しない（線質非依存性）。線質とは放射線の種類とエネルギーによって異なってくる放射線の性質のことである。例えばα線とγ線を比べてみると、その物理的性質はいろいろな点で異なっているし、同じ中性子線でもエネルギーの違いによっ

て物理的性質は相違している。これらの相違に依拠して異質の障害が現れることはない、というのが線質非依存性である。
　白内障は中性子線を扱う場合に警戒すべきものとされているが、喉頭ガンのγ線治療でも起こりうる。
(3)ある潜伏期間を経て晩発性障害の現れることがある。すなわち被曝者は被曝の直後、あるいは間もなく現れる早発性障害がひとまず癒えた後に、晩発性の障害に悩まされる危険性がある。
(4)右の(3)と密接に関連するが、臨床経過が複雑で、再発、併発、悪性変化（ガン変性）が起こりうる。
(5)被曝の影響は当の被曝世代にとどまらず、後続世代にも及ぶ。このことが、放射線被曝管理を厳しいものにしている大きな要因になっている。
(6)そのほか、障害とは直接の関係はないが、放射線が視覚や知覚などの五感で感知できないこともあげられよう。

２　放射線障害にはどのようなものがあるか

放射線によって引き起こされる障害を、発生の状況二つと被曝の状況四つを指標にして分類・

整理してみたのが図5－1である。

発生の状況（時期）によって

①被曝世代に現れる身体的障害と、生殖細胞を介して次世代や後続世代に出現する遺伝的影響とに分けられる。後者に関しては「障害」という用語よりは「影響」という用語が適切であるとされている（身体的障害については本章二、三－1および三－2で、遺伝的影響については三－3で述べる）。

②は、被曝の時点と障害発生の時期との間の時間的関係から設定された指標である。被曝の直後あるいは短時間内に現れる障害は、早発性障害あるいは急性障害と呼ばれている。一方、晩発性障害あるいは遅発性（慢性）障害は、早発性障害が回復してから、あるいはそれを経過せず長期の慢性的被曝の結果、数年～数十年後に発生する。これらの中間に亜急性障害（例――皮膚障害）を設ける場合もある。

被曝の状況によって

③線源の位置から体外被曝によるものと体内被曝によるものとに分けられる（上半分が体外被曝、下半分が体内被曝である）。繰り返しになるが、体内被曝はＲＩによって、体外被曝はＲ

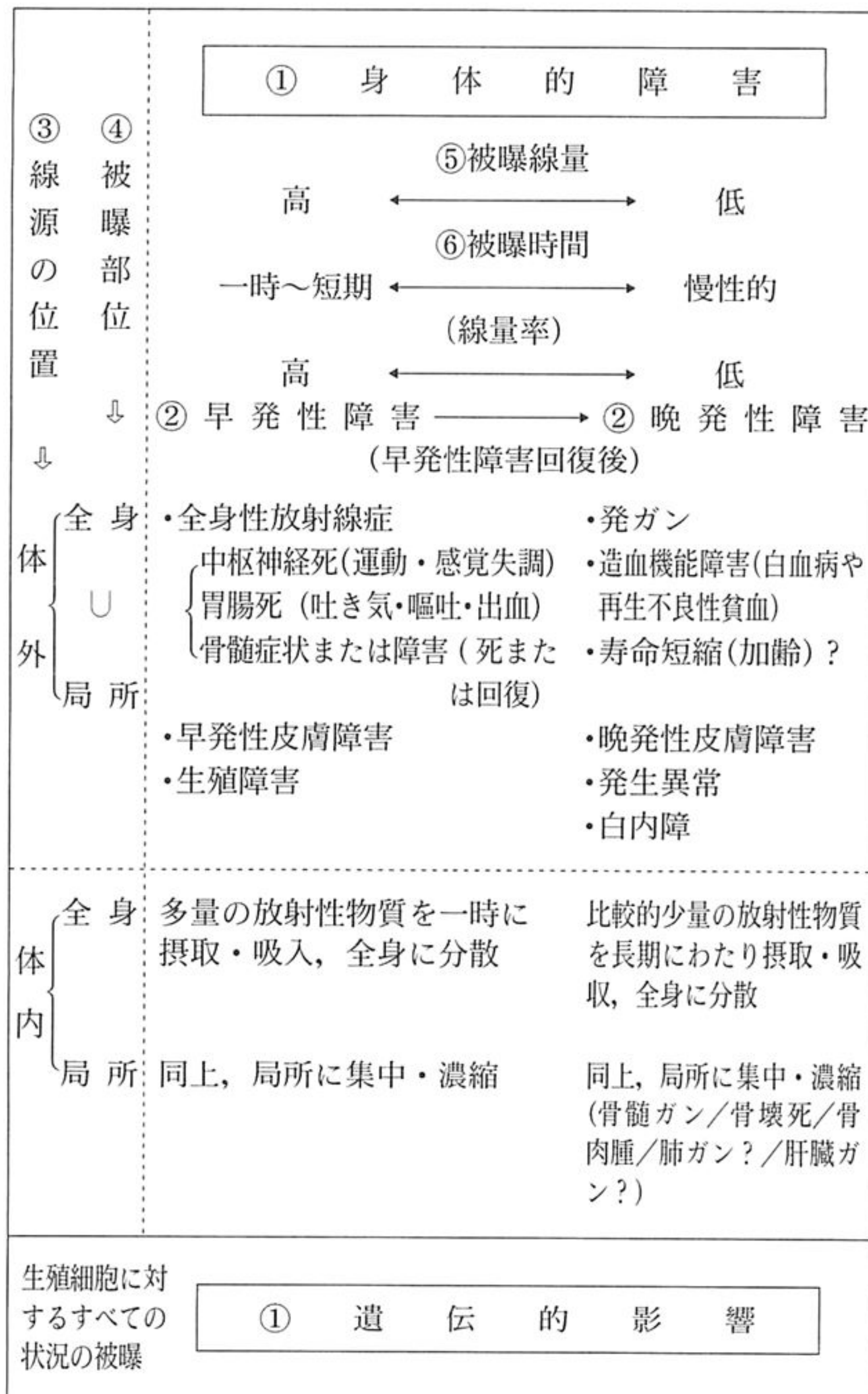



図５－１　放射線障害の分類

Iを含めたすべての放射線源によってもたらされる。

④体外被曝障害と体内被曝障害のそれぞれを、被曝部位が全身か局所かによって、さらに全身被曝障害と局所被曝障害とに分ける。

全身被曝障害は身体の広域にわたって放射線を浴びた場合に発生し、それを多量に受けた場合は全身性放射線症と呼ばれる重篤な症状が現れる。

局所被曝について次の諸点に注意していただきたい。

(1)図中の∪は、全身被曝が局所被曝をも含むことを示す。

(2)高線量であっても局所被曝による急性死は多くはない。これは、体のある部域が局所的に被曝してそこの造血組織にダメージが加えられても、造血組織（骨髄）が体に広く分布しているため致命的とはなりにくいからである。

(3)ガンの治療などの医療被曝は、やむをえず受ける局所被曝の例といえる。裸出状の皮膚、生殖腺、裸眼は、局所被曝によっても特有の障害が誘発されやすい。

⑤症状の帰趨を左右する要因の一つは、被曝線量（総線量）である。そのレベルを高↕低としたが、中間にはいろいろな線量が考えられる。

⑥もう一つの要因は被曝時間、すなわちある線量の放射線を浴びた時間である。一定線量の放射線を一時にあるいは短時間で浴びる場合と、長期にわたって慢性的に浴びる場合とでは、

障害の現れる速度が違う。

すなわち、浴びた線量を時間で割って得られる線量率が重要な要因になる。これも高から低に向かってさまざまな段階がありうる。

⑤と⑥の要因は、障害発生までの時間と障害の程度とを左右する。すなわち、

(1)一般的に、高線量・高線量率被曝は早発性障害を（そしてそれが回復しても晩発性障害を）、一方、低線量・低線量率被曝は晩発性障害を引き起こす。

(2)総線量が同程度でも、短時間に被曝した高線量率被曝の方が、長期にわたる低線量率被曝よりも大きな障害をもたらす。

二　身体的障害

１　体外被曝による障害

ａ　早発性障害

全身性放射線症

全身性放射線症というのは、全身に一回で（短時間内に）多量の放射線を浴びたときに早期に現れる放射線障害である。

表5－1　放射線施設事故の被曝者

被災者	A －*	B －*	C 女44歳	D 男20歳	E 女13歳	F 男39歳
被曝線量(グレイ)						
全身平均	80	40	8	6	4	2
生殖腺			18	7.3	1.8	2.1
全身被曝の主症状	胃腸(？)	胃腸	骨髄(重度)	骨髄(重度)	骨髄(中度)	骨髄(軽度)
生死	死亡 12日目	死亡 11日目	生存	生存	生存	生存
諸症状 出血**	10	8	8	15	8	なし
高熱**	8	8	8	20	26	なし
脱毛	＋	＋	＋	＋	＋	－
白血球数最低値／mm³ (被曝後日数)	100 (10)	55 (10)	55 (25)	297 (17)	213 (28)	6000 －
加療(骨髄移植)	＋	＋	＋	＋	－	－
生殖機能			無月経	恒久不妊(性生活は正常)	1男1女(生殖機能正常)	一時不妊

この事件は，1963年に中国で発生し，被災者はコバルト60-γ線の全身不均一被曝を受けた．表記載以外の急性症状である倦怠感，疲労感，食欲不振，吐き気，嘔吐などが全員に見られた．＊年齢・性別不詳　＊＊被曝後の開始日
治療：絶対安静，適量の栄養，感染防護．EとFに新鮮白血球と血小板を輸血
経過：C～Fでは1カ月で危険期を去り，2カ月で実際上の治癒を見た
晩発性症状：末梢リンパ球の染色体異常(4名)，免疫グロブリンの低下(1名)など
(Ye, G.Y. et al〔1980〕による〔近藤の著書に引用された表を改変〕)

表5－1に中国で発生した事件で被曝者に記録されたこの種の症状の実例を示してある。この他の実際例としては、広島・長崎の原爆被災者、原子力施設事故被曝者、不測事態の犠牲者、放射線治療患者などがある。

広島・長崎の早期の死者は一九四五年に約二一万人（その後一九五〇年までに約一三万人）とされ、その四分の三は熱・爆風・倒壊した建物の下敷きによるものであり、残りの四分の一が放射線によるものとされている。被曝した主要な放射線は中性子線およびγ線であった。

広島・長崎における気の遠くなりそうな数の犠牲者を除けば、このような全身性放射線症で亡くなった人の数は、私たちが想像するよりもはるかに少ない。フランスのネノという学者によれば、一九八九年までにチェルノブイリ事故の三一人（内三人は転落死などが原因）の他に、作業員一三人、住民三〇人とされ、全世界で三桁の数字に達していない（詳しくは第七章を見よ）。

〈線量と寿命〉

全身性放射線症は、線量によってさまざまな様相を呈する。

図5－2に、線量と寿命の関係についてマウスで行われた実験結果の一報告例を示す（数値は文献により相違している）。

数百グレイ以上を照射するとマウスは即死する。死亡の原因は生体分子の瞬時の変性による

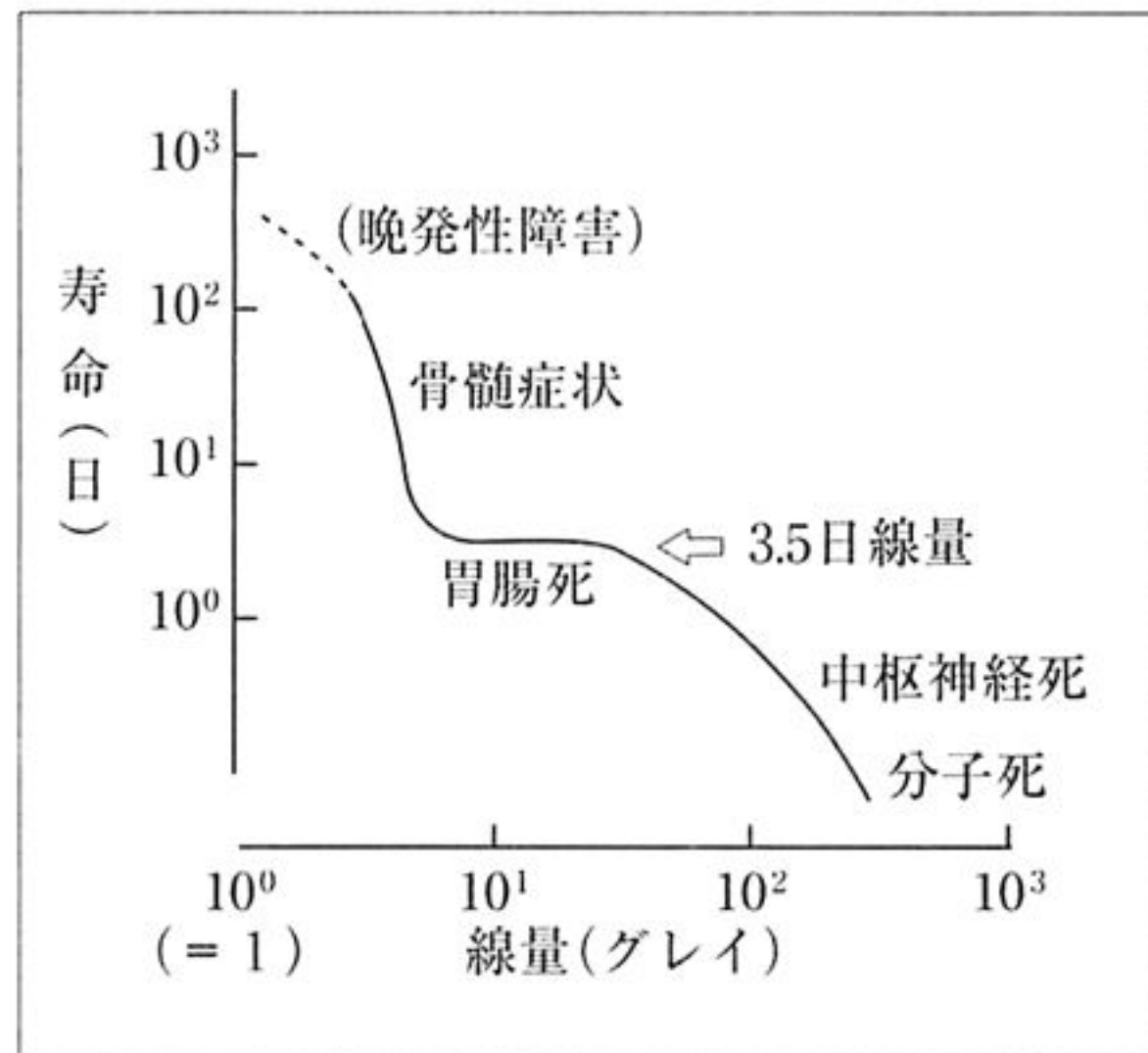



図5－2　線量と寿命の関係（マウス）

もので、分子死とも呼ばれる。

三〇～数百グレイで引き起こされるのは中枢神経系死で、障害が比較的放射線抵抗性の高い中枢神経系にも及び、マウスの意識はほとんどなく、ショック状態で数日以内に死亡する。それよりも少ない六～三〇グレイの照射でも、マウスは通常、死を免れることはできない。この場合、死の主要な原因となるのは腸上皮の崩壊で、それゆえ胃腸死（あるいは腸死）とも呼ばれる。この線量範囲では寿命が三・五日と一定値を示す。正常な生体では、再生組織である消化管壁の腺窩（せんか）という部分で新生された幹細胞が三・五日で機能細胞の絨毛にまで成熟し、その機能を果たして疲弊し、消化管の内腔に脱落してゆく、という過程が継続される。ところが、右記のような線量を浴びた組織では、幹細胞が細胞分裂を停止するために、脱落した絨毛の補塡がなされず、消化管壁がいわば〝穴〟のあいた状態になる。その結果、この穴を通って体内の血液が消化管内に漏出して下血（糞便に血がまじる症状）が起こったり、体内の水が逸出して脱

水状態に陥ったり、あるいは消化管内の細菌が血液に侵入して感染症（敗血症・菌血症）を起こしたりして、これらが死の原因となる。

さらに少ない線量の三～八グレイの照射で見られる全身症状を骨髄症状と呼んでいる。この線量範囲の照射ではマウスの一部が死を免れる。すなわち障害を克服する。骨髄症状と呼ばれるわけは、症状の主因が骨髄の造血組織の障害によっているからである。それについては、次に改めてとりあげる。

これ以下の線量域では、早発性の全身症状は顕著ではないか、あるいは見られない。ただし、晩発性障害が現れ、それによって寿命が短縮する可能性が考えられる。

ヒトに当てはめると、中枢神経死、胃腸死、骨髄死のそれぞれを引き起こす線量について、一〇〇～数百、一〇～三〇、七グレイという記載が見られる。

骨髄症状の経過

$LD_{50(30)}$という指標がある。これは三〇日以内に五〇％（半分）の生物個体を死に至らしめる線量という意味で、半致死線量という。ただし、ヒトでは$LD_{50(30)}$ではなく、$LD_{50(60)}$、すなわち六〇日以内の半致死線量が採用されることも多い。ヒトの$LD_{50(30)}$は三～四シーベルトとされている。すなわち、この線量範囲では、半分の個体が死亡し、残り半分の個体が早発性の

障害から回復する、ということである。骨髄症状は、骨髄幹細胞の感受性が消化管壁腺窩のそれより高いので、胃腸死より低線量で現れる。一般的な経過は、次のようなものとされている。

①先駆期（前駆期）――被曝直後に全身疲労感・吐き気・嘔吐などの、いわゆる宿酔症状（船酔症状ともいう）が現れるが、これは放射線の中枢神経や腸への作用によっている。皮膚の紅斑（発赤）やリンパ球数の急激な減少も、先駆期の特徴的な症状である。

②その後、患者が一見して快癒したのではないか、と思われるような無症状の期間がしばらく続く（潜伏期）。

③しかし、その期間を過ぎると病状がぶり返し、患者がたいへんな苦痛に悩まされる段階に入る。この段階を発症期、悪化期あるいは骨髄減少期などという。

障害または死の主因は感染症（敗血症・菌血症）である。感染症は、骨髄幹細胞のダメージによる血液細胞の補給の中断のために起こる。すなわち、リンパ数の減少によって免疫能が低下し、また白血球数の減少によって食菌作用が減退し、こうして血液が有害な細菌の跳梁跋扈に太刀打ちできない状態になる。被曝患者を無菌室に収容するのは、感染を極力防止するためである。また、この線量域でも小腸壁が部分的に破壊されているので、腸内細菌の血液への侵入を招き、それが感染症を助長することもありうる。

発症期に見られる高熱・発汗などの症状は中枢神経の、そして腹痛・下血などの症状は腸壁の障害にそれぞれ関係している。

重篤患者にはしばしば他人の骨髄（最近の東海村事故では新生児の臍帯血（さいたいけつ））の移植を行うが、これは、幸か不幸か被曝患者の免疫能が著しく低下し、異質の細胞でも拒絶反応の壁を乗り越えて受け入れることが可能になるためである。

④先駆期・潜伏期・発症期を経過したのち、死亡するか、回復に向かう。回復は、造血能力の復元による。しかし、回復した場合でも、長い年月の後に晩発性障害の発生する恐れが残る。

血液組成の変化

血液細胞数の回復は、その細胞自体の放射線感受性と血液中での寿命に左右される。リンパ球は感受性が高い上に寿命が短いので、被曝後短時間で激減する。白血球は感受性や寿命の点からリンパ球よりは遅れて減少し始める。回復は造血組織が致命的なダメージを受けていなければ、わりあい早い。

赤血球は寿命がほぼ一〇〇日ときわめて長く、かつ放射線に対する抵抗性が高いため遅れて減少が始まり、その復元には時間がかかる。血小板（栓球ともいう）は、これらの中間の変動経過をたどる。

生殖障害

子供ができなくなることを不妊という。これは、男性なら精巣、女性なら卵巣に一時または数回にわたってかなり多量の放射線を浴びた場合に起こる。

表5－2にさまざまな生殖障害と線量との関係を示した。表5－1の被曝患者たちに現れた生殖障害とのおおまかな対応づけを試みてある。

生殖腺の中にはいろいろな発生段階にある多種類の細胞が存在する。精巣の場合は、幹細胞である精原細胞、それが分化してできる精母細胞、精母細胞が特殊化してできる精子である。ベルゴニエ・トリボンドーの法則によれば、放射線感受性は精原細胞がもっとも高く、一方、放射線抵抗性は精子がもっとも高い。精原細胞の受ける障害の程度によって、ごく短期間あるいは一～二年の一時的不妊、恒久的な不妊、生殖機能回復不能に至るまでの、さまざまな生殖障害が現れる。精子の高抵抗性のため、精原細胞の機能が失われるような線量でも、被曝時に貯留されている精子がすべて放出されるまでは、生殖能力は残存する。性欲の喪失（いわゆる去勢）は、性ホルモ

表5－2　生殖障害

線量 (シーベルト)	妊娠能力への影響	表5-1のどの患者に相当するか*
1.5	ごく短期間の生殖力の低下	E（1.8）？
2.5	1～2年の一時的不妊	F（2.1）？
5	多くの人に恒久的不妊	D（7.3）
8	生殖機能回復不能	C（18）

＊(　)内の線量はグレイ単位

ンを分泌する細胞（間細胞）の放射線抵抗性が高いので、さらに高線量の被曝で起こる、とされている。

卵巣は精巣とは異なって細胞非再生系である。すなわち、胎児の段階においてすでに、卵巣内で卵原細胞から卵母細胞の形成が完了しており、新生児にはもはや卵原細胞は存在しない。そして成人になってから卵母細胞が周期的に卵子にまで成熟して排卵が起こり、閉経時までその数が減少していく。卵母細胞の放射線感受性がきわめて高いこと、卵子に分化し排卵されるまでの待機時間が長いことなどから、卵母細胞が浴びた放射線の影響は累積されていく、とも考えられる。もしそうなら、卵母細胞への、例えばアルコールやニコチンなどの放射線以外の影響も蓄積される可能性のあることに留意すべきだろう。

早発性皮膚障害

早発性皮膚障害は、晩発性皮膚障害とまとめて述べる。

ｂ　晩発性障害

造血機能障害

細胞生産が停止する結果、再生不良性貧血・白血球減少症・血小板減少症などが現れる。ま

た、未熟細胞の異常増殖によって起こるのが、白血病や真正多血症である。白血病の潜伏期間は短い場合で被曝後二〜三年で、七〜八年後に発症のピークが現れる。

皮膚障害

皮膚は、造血組織や腸上皮より低感受性であるにもかかわらず、その放射線障害がよく調べられている。その理由として、特に初期のX線医師や技師、看護婦は被曝する機会が多く、そのため記録されている症例が多数残されていること、肉眼観察が可能であること、早発性の場合は線量-効果関係の定量的関連づけが可能（例えば紅斑や脱毛）であること、などがあげられている。

〈早発性（急性）皮膚障害〉

いわゆる皮膚は、体表面の表皮（上皮組織の一種で角質層・顆粒層・有棘層・基底細胞層よりなる）と、その下の結合組織である真皮とから構成されている。放射線の影響は、表皮の基底細胞層の幹細胞と、真皮の部分に特に著しく及ぼされる。皮膚障害は通常の火傷の重症度に対応づけて第一度から第四度までに分類されている。なお、皮膚の感受性は、頸＞顔＞腹＞四肢の順に高くなる。

第一度（三グレイ以上）の脱毛は、真皮に位置する毛球（毛のう、毛包とも）の細胞の分裂能

れる。毛の抜けやすさは頭髪＞睫毛（まつげ）＞眉毛の順とされる。
第二度（五～六グレイ以上）の紅斑は、障害を受けながらも生活能を保有している細胞が反応するために現れる。初期のものは血管拡張によって、そしてそれが鎮静して二～三週後に現れるものは真皮の炎症によっている。表皮に色素沈着が起こる。
第三度（一六グレイ以上）の水泡の形成は、表皮さらには真皮に組織液がたまるためである。水泡が破れると糜爛（びらん）状態となる。
第四度（二〇グレイ以上）の潰瘍（かいよう）は、血管の栄養障害のためで、全層が壊死する。末梢神経が放射線に抵抗性が高く障害を受けにくいために激痛を伴う。
〈晩発性（遅発性・慢性）皮膚障害〉
例えば、手の皮膚に年間一〇〇〇レントゲン（X線ではほぼ一〇シーベルト）あるいはそれ以上の線量を一〇年間に一〇〇シーベルト以上被曝した職業的X線取扱者の場合、その後の年月の間に、皮膚の乾燥などのわずかな変化、爪の変化、いぼの発生、感覚の異常、光沢異常、斑点の形成、角質化の進行、脱毛、ひび割れ、疼痛の発生、血管の異常、腫瘍の形成、皮膚ガンの発生、のように病状が進行、悪化する。
一九三六年にドイツ・ハンブルグの放射線学会は、放射線医学のために犠牲となった医師・技師・看護婦の功績を讃える『顕彰書』（Ehrenbuch）を刊行した。その初版には、一六九名

の犠牲者の氏名が記載されている。一九五九年の第二版では総数は三六〇名で、うち邦人は二八名だった。

日本医学放射線学会も一九七二年に、『顕彰書』後の物故者二七名のリストを発表した。その内訳は、直接の死因が放射線ガンであった人一六名で、うち一三名は皮膚ガンによるもの、放射線ガンが直接の死因ではないが、放射線によるガンのあった人三名、放射線による重篤な症状のあった人八名である。

発生異常

発生異常とは、受精卵から発生した胚や胎児が母体内で被曝するとき、新生児に現れる障害のことである。胎児障害ともいわれ、世代にまたがるので晩発性障害として扱われることがある。

これについては、マウスを用いて行われた有名な実験がある（図5−3）。この実験では、受精後いろいろな時期のメスのマウスに二〇〇レントゲン（ほぼ二グレイ）のX線を全身に一回照射し、新生児に現れる障害の種類と発生率が調べられた。

動物の発生は、〔受精〕→受精卵→胚（はい）（幼的状態の生物のことで、桑実胚（そうじつはい）・胞胚・嚢胚（のうはい）など）→〔子宮着床・器官形成〕→胎児→〔出生〕と進行する。図からわかるように、発生異常は照射

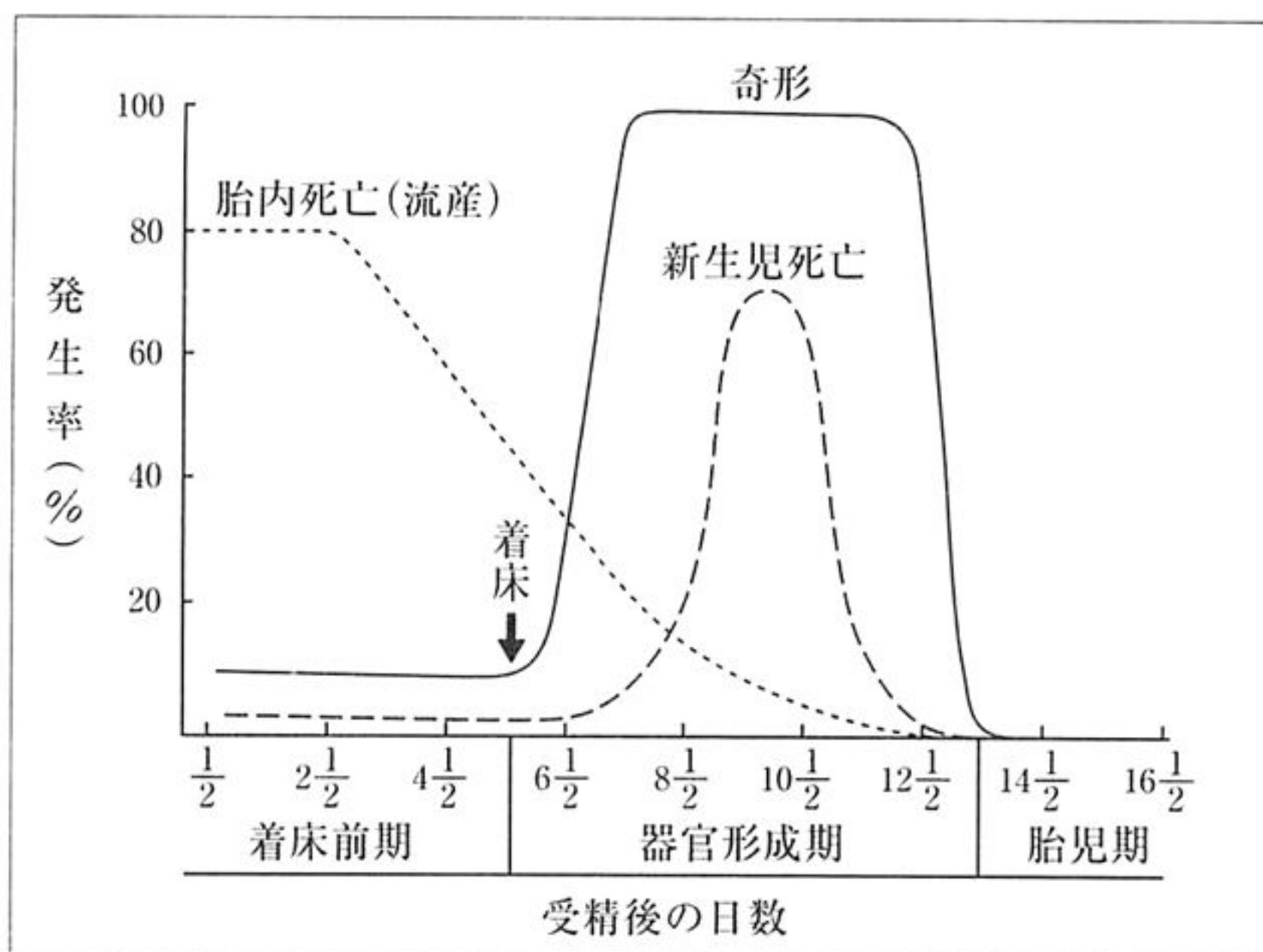



図5－3　マウスの発生異常

した時期に左右される。子宮着床前の胚の段階で照射されると、八〇％が出生前に死亡する、つまり流産する。ところが、残りの二〇％は正常に発生し、出生後にも異常は認められない。しかし、発生が進み、胚が子宮壁に着床して器官の形成が行われる時期（器官形成期）に被曝すると、新生児の一〇〇％に各種の奇形（例えば無頭症、目の欠損、水頭、脊髄異常、小頭症）が現れ、しかもその七〇％は出生後に死亡する。このことから、器官の原基となる胚的な細胞（例えば神経芽細胞）が放射線に対して高感受性であることが理解できよう。

ヒトの場合はこのような実験をすることはできないが、調査から得られたデータ（表5－3）によると、着床前の被曝による子宮内

表5－3　ヒトの発生異常

発生段階	週		影響	しきい線量(シーベルト)
着床前期	～2	胚	子宮内死亡	0.05
器官形成期	2～6	胚	奇形	0.05
胎児期	6～40	胎児	発育遅延	0.1
胎児期	8～15	胎児	精神的発達遅延	0.01～0.1

死亡や、器官形成期の被曝による新生児の奇形出現、胎児期に入ってから放射線を受けた場合の発育遅延・精神的発達遅延などが指摘される。一〇〇〇人中に五人ぐらいに障害をもたらす可能性のあるしきい線量は、奇形の発生に関しては〇・〇五シーベルト程度、また肉体的・精神的な発達異常に関してはそれよりやや高い、とされている。妊婦が用心しなければならないのは、妊娠してから四カ月までで、特に各種の器官が形成される二～六週目における放射線被曝である。なお文献によっては、しきい値を上記の表の値より二～五倍ほど高くとっているものも見られる。胎児の母胎内被曝では、新生児に白血病などのガン発生の危険が高く、また、その次世代に遺伝的影響が及ぼされることもありうる。

胚や胎児へのこのような放射線の影響を考え、女性のX線検診は、妊娠のおそれのない月経開始後一〇日以内に行うよう薦められている（一〇日ルール）。

白内障

白内障とは視力障害を伴う水晶体混濁で、単なる水晶体混濁とは区別される。放射線が作用

すると水晶体の上皮細胞が変性し、繊維にまで分化しないために引き起こされる。潜伏期間は六カ月～三五年と幅があり、平均二～三年である。水晶体混濁は、急性被曝で二シーベルト、慢性被曝で五・五シーベルト、一方、白内障は一〇シーベルトで起こるという。年齢に依存し、幼児ではX線量が二〇〇レントゲン（約二シーベルト）以下でも起こる。速い中性子線など線質係数の高い放射線が特に危険であるとされるが、これについては異論もある。水晶体は血管がないため酸素分圧が低いので、線質係数の低いX線のような放射線では酸素効果（低い酸素分圧下で放射線感受性が低下する現象〔第九章一八三ページ参照〕）が現れるが、線質係数の高い中性子線のような放射線ではこの恩恵を受けない、とされている。

寿命短縮――加齢（老化の促進）

一九五六年にアメリカで発表された次のような疫学的調査がある。それによると、一九三〇年一月一日から一九五四年一二月三一日までに亡くなった死亡年齢のわかっている医師八万二四四一人についてその寿命を調べたところ、放射線科医――六〇・五歳、ある程度放射線を浴びた医師（胃腸・結核・泌尿器科医）――六三・三歳、皮膚科医――六二・三歳、非放射線科医――六五・七歳、一九三〇年に二〇歳以上だった男子――六七・一歳であった。この調査結果は、放射線が寿命の短縮（加齢すなわち老化の促進）を引き起こすことの証とされた。しかし、

戦後の調査では、別の結果が得られている(二一〇ページ)。

問題は、どの程度の量の放射線を、どんな形で浴びたかということにもある。

近年、バックグラウンド(自然放射線)の一～二桁、つまり一〇～一〇〇倍高い、いわゆる低線量被曝が生体にもたらす影響が話題になっている。地球上にいくつか存在する高バックグラウンド地方に住む住民の平均寿命が通常の地域の住民よりむしろ高い、という資料もある(二〇九ページ)。

マウスやラットを用いた動物実験では、γ線の連続照射によって自然死による寿命の短縮がはっきり認められるのは、その一週あたりの照射線量が一〇ラド(〇・一グレイ)、すなわちバックグラウンドの数千倍高い場合であった。このような線量は、もう低線量とはいえない。ヒトについては今日、放射線が寿命の短縮を引き起こすという証拠はない、とされている。

2　体内被曝による障害

体外被曝による放射線障害は、X線発見の一カ月後にはすでに認識されていた。例えばX線を浴びると紅斑や脱毛などが起こるという事実である。アンリ・ベクレルはウランを用いて、またピエル・キュリーはラジウムを用いてみずからの体を張った〝実験〟を行った。しかし、放射性物質が体内に入ったために起こる体内被曝障害が認識されたのは、ようやく一九三〇年

表5－4　有効半減期

放射性核種	物理的半減期	生物学的半減期	有効半減期	決定器官	消化管から血液への移行率(%)	血液から決定器官への移行率(%)
^{3}H	12.3年	12日	12日	(全身)	100	100(全身)
^{14}C	5730年	10日	10日	(全身)	100	100(全身)
^{32}P	14.3日	1156日	14.2日	骨	75	50
^{35}S	87.5日	623日	76.4日	睾丸	100	0.9
^{45}Ca	163日	49.3年	162日	骨	60	90
^{90}Sr	28.7年	49.3年	18.1年	骨	95	90
^{131}I	8.0日	120日	7.5日	甲状腺	100	30
^{226}Ra	1600年	44.9年	43.7年	骨	30	99
^{238}U	4.47×10^{9}年	300日	300日	骨	＜0.01	85

H水素, C炭素, Pリン, Sイオウ, Caカルシウム, Srストロンチウム, Iヨウ素, Raラジウム, Uウラン

代のことである。今日では核兵器実験や原発事故によってまき散らされるフォールアウト（死の灰）が人体に入って引き起こすかもしれない障害に、大きな関心が向けられている。

有効半減期

体内被曝で問題になる重要な要因は、放射性核種（あるいは放射性同位体＝RI）が体内に留まる期間である。RIは物理的に減衰するだけでなく、生体の代謝活動によって体外に排出されもする。それぞれによってRIが半減するまでの時間を物理的半減期および生物学的半減期という。すなわち、体内に入ったRIの減少は、これら二つのことがらが相乗して進行することになる。その速さは、有効半減期（注）という指標で示される（表5－4）。有効半減期は生物学的排出が物理的減

衰よりはるかに速い水素3、炭素14、ウラン238などでは生物学的半減期とほぼ等しい値に、逆に、生物学的排出が物理的減衰よりかなり遅いリン32やカルシウム45では物理的半減期と近い値になる。ラジウム226は前者のタイプの、ヨウ素131は後者のタイプの核種である。

〔注〕 1／物理的半減期 ＋ 1／生物学的半減期 ＝ 1／有効半減期

早発性障害

〈全身被曝による障害〉

これは、多量の放射性物質が一時に摂取あるいは吸入され、それらが全身に分散することによって早期に現れてくるような障害である。

全身にあまねく分布する元素、すなわち水素と炭素のような生体を構築する多量元素で問題になるが、いずれの放射性核種も有効半減期が一〇日程度ときわめて短いので、重篤な障害をもたらす恐れは小さい。症例について発表された資料は少ないが、多量の（一回にキュリーオーダーの）放射性トリチウムガスを使用する実験を行った後ではカゼ気味になる、という話を耳にしたことがある。しかし多量元素である酸素や窒素の場合は、これらの元素に物理的半減期の長い放射性同位体が存在しない（四〇ページ表3－2参照）ので、問題は起こらない。

かつて漁船第五福龍丸船員久保山愛吉が、一九五四年に南太平洋ビキニ環礁でアメリカが行

った水爆実験で放出された死の灰を浴び、ほぼ半年後に死亡した（直接の死因は肝臓障害だった）。〝急性放射能症〟という病名をつけられたが、これは、死の灰からの放射線を体外から、そして体内において浴びた結果生じた早発性の放射線障害だった、と考えられる。

〈局所被曝による障害〉

これは、多量の放射性物質が一時に摂取あるいは吸入され、それが局所に集中・濃縮されて現れてくる障害である。かつてラジウム（トリウムXと呼ばれた）の危険性がまだ認識されていなかった時代に、その液を過剰に注射して亡くなった婦人は、この例となるかもしれない。

核医学（第六章一二二ページ）の現場では、病気の診断や治療のため放射性物質を体内に注入することが行われている。成人の甲状腺障害の診断には六〇マイクロキュリー（文献によれば、この量の核種が人体から消滅するまでの甲状腺の総被曝線量は〇・五～一グレイになる）、その治療には六ミリキュリーの放射性ヨウ素が投与されることがあり、甲状腺がかなりの体内被曝を受ける。その影響に関する疫学的調査については、一六〇ページを参照されたい。

晩発性障害

晩発性障害は、比較的少量の放射性物質が長期にわたって摂取・吸入され、それが全身に分散する（全身被曝）か、局所に蓄積される（局所被曝）ことによって、ある時間を経過した後

に現れてくる障害である。

〈全身被曝による障害〉

セシウム137は、体に取り込まれた場合に、全身に分布する筋肉に吸着されて肉腫（結合組織のガン）を起こすという記述（一六ページ）があるが、そうならこの症例は全身体内被曝による障害として扱うことができよう。しかし、この記述は具体的資料にもとづいたものではない。しかも、筋肉は細胞非再生系に属し、放射線にきわめて鈍い。

〈局所被曝による障害〉

局所集中性のＲＩは、高度の局所被曝をもたらす恐れがある。ストロンチウム90やラジウム226は骨に、ラドン222は肺に、ヨウ素のＲＩ（数種存在するが、生体内におけるそれらの行動は同じと見てよい）は甲状腺に、それぞれ蓄積されやすい。これらの特定の器官を当該ＲＩの決定器官という（表５－４）。消化管に摂取されたＲＩのうち、決定器官に実際取り込まれるＲＩの量は、消化管から血液に移行する割合、そして血液から当該決定器官に移行する割合に左右される。例えばヨウ素のＲＩに関して見れば、血液移行率は一〇〇％、そして決定器官移行率は三〇％で、消化管に摂取されたＲＩはすべて血液に入るが、決定器官に移行するのはその一部である。一方、ラジウム226では、これらの値はそれぞれ三〇％および九九％で、消化管から血液には入りにくいが、いったん血液中に取り込まれると、そのほとんどすべてが決定器官の

骨に移行する。

これらのRIは何らかの化合物として行動すると考えられるので、その化学的形態と性質が問題になろう。ヨウ素のRIは有機化合物チロキシン（ホルモンの一種）の構成元素となり、ラジウムは炭酸塩あるいはリン酸塩という無機化合物の形で骨の成分となる。しかし、ラドン222は化学的に不活性な気体なので、生体内のいかなる物質とも化合することなく、吸気とともに肺に達すると、その一部が肺組織に物理的に吸着する。

体内被曝におけるRIの危険度は、右に述べた決定器官への取り込み率の他に、その有効半減期と放出する放射線の線質（種類とエネルギー）によっても左右される。有効半減期の長い放射性核種ほど、長期にわたって組織を蝕む。ラジウム226やラドン222のようにα線を出すすべての核種、ストロンチウム90のように高いエネルギーのβ線（実際にはその壊変で生成するイットリウム90による）を放出する核種が特に危険である。

次に、これまで問題になった症例をいくつか記そう。

(1)骨・骨髄の障害

前世紀の一〇～二〇年代にアメリカで女工が夜光塗料のラジウム226を時計の文字盤に筆で塗布する作業に従事した。そのさい彼女たちは、舌で筆先を揃えた。その結果、筆先に吸着されたラジウムが唾液とともに女工の体内に入った。ほぼ四半世紀後に骨髄炎・骨壊死・骨肉腫・

貧血が頻発した。潜伏期間が長く、六〇年代の発症例も知られている。遺体の骨を分析してこのＲＩの存在が確認され、この核種と骨障害の因果関係が立証された。

(2)肺ガン

ＲＩ発見以前の時代にチェコスロバキアの銀山ヨアヒムスタールの坑夫五八人の死者のうち肺ガンによる死亡者が一九名に上った。ラジウム226の崩壊で生成するラドン222のガスを吸入し、それが肺に蓄積したためとされるが、ラジウムの場合のような確証はない。

(3)肝臓ガンあるいは白血病

かつてX線造影剤としてトロトラストという放射性のトリウムを含む酸化トリウム（ThO_2）が用いられた。投与後かなり経てから被験者に肝臓ガン（脾臓ガンや腎臓ガンも）が現れ、発生率が経年的に増加した。同じ傾向は白血病についても見られた。ただし、因果関係についての確証は得られていない。

(4)甲状腺ガン

チェルノブイリ事故後一〇年経過した一九九六年におけるロシアの発表では、〇～一五歳の子供八〇〇人が甲状腺ガンにかかり、そのうち三人が死亡、多くは早期の発見と治療によって助かったという。なお、この話題については、一五八ページをご覧いただきたい。

体内被曝の管理（防止・評価）の厄介な理由

⑴ＲＩを含む物質は、通常の物質と同様、飲み物・食物、あるいは空気に含まれた形で体に摂取されるが、ＲＩだけを除いて取り入れることはできない。

⑵体内に入ったＲＩだけを除去する効果的な方法はない。チェルノブイリの事故後にヨウ素剤（ヨウ化カリ）が服用されたのは、ヨウ素の非放射性核種（ヨウ素127）で甲状腺を満たしておき、放射性ヨウ素が入りにくいようにするためで、放射性ヨウ素を体内から除去するのが目的ではない。体内に入った放射性物質を体外に追い出すいろいろな物質が研究されているが、実験動物に対して用いる場合は別として、人体に用いるのは、その効果の度合いと副作用を考えると問題がある、とされている。

⑶体内に現存するＲＩの種類と数量の正確な把握が容易ではない。体表面に放射線検査器をあてがって体内から出てくる放射線を計測する方法である程度捕捉できるのは、透過力の大きいγ線を放出するＲＩにほとんど限られる。α線を出す放射性核種は、通常γ線も放出するので、この方法でも捕捉できることがあるが、弱いβ線しか出さない核種はつかまえにくい。バイオアッセイ法は、呼気や糞尿を採取して行う方法で、その分析操作は面倒だ。

三　確率的影響

確率的影響に属する発ガンについては、確定的影響を扱った本章二の身体的障害の箇所でもすでに部分的にとりあげていることをお断りする。

1　影響の評価

第四章で述べたように、確率的影響とは、放射線が当代世代においてガンを発生させ、あるいは後続世代に遺伝的欠陥をもたらすような作用効果のことである。これらの危険性の度合いは、放射線のもう一つの効果である確定的影響とは異なり、発生の確率・頻度・リスクとして評定され、統計的な扱いを受ける。確率的影響と関係づけられる放射線の線量を実効線量当量という。実効線量当量は、被曝した各器官が受ける線量当量に、ある係数を掛けて得られる。この係数を組織荷重係数といい、その値は組織・器官ごとに同じではない。すなわち、確率的影響における各組織・器官の相対的重みを示す数値である。荷重係数の総和を一・〇〇とし、遺伝的影響（卵巣ガンを含む）に〇・二〇、既知の各種のガンに〇・七五、残りのガンに〇・〇五がそれぞれ割り振られている（表5－5）。確率的影響の発生確率を示すためにリスク係数という概念が導入されている。これは過剰致死率とも呼ばれる（表5－5）。

表5－5　確率的影響における荷重係数とリスク係数

組織または臓器	問題となる確率的影響	組織荷重係数	リスク係数* 全集団	作業者
胃	胃ガン	0.12	1.10	0.88
肺	肺ガン	0.12	0.85	0.68
結腸	結腸ガン	0.12	0.85	0.68
赤色骨髄	白血病	0.12	0.50	0.40
膀胱	膀胱ガン	0.05	0.30	0.24
食道	食道ガン	0.05	0.30	0.24
乳房	乳ガン	0.05	0.20	0.16
肝臓	肝臓ガン	0.05	0.15	0.12
卵巣	(卵巣ガン)		0.10	0.08
甲状腺	甲状腺ガン	0.05	0.08	0.06
骨表面	骨ガン	0.01	0.05	0.04
皮膚	皮膚ガン	0.01	0.02	0.02
残りの組織・臓器	その他のガン	0.05	0.50	0.40
	ガン計		5.00	4.00
生殖腺(遺伝的影響と卵巣ガン)		0.20	1.00	0.60
		1.00		

*10⁻²／シーベルト　　(ICRP勧告〔1990〕)

表5－5から、作業者（放射線作業従事者）の致死ガンのリスク係数は、一シーベルトあたり4.00×10^{-2}と読みとることができる。これは、仮に一〇〇人の集団があった場合、これらの集団構成員全員が一シーベルトずつ被曝すると、そのうちの四人がガンで死ぬこと、ある個人が一シーベルトを被曝する状況が一〇〇回あった場合、ある四回の被曝でガンで死ぬこと、などのいずれをも意味するということである。すなわち、放射線によるガン死などの確率

的影響を逓減するためには、集団構成員全体の実効線量当量を可能な限り低く抑える対策が要求される。

なお、国際放射線防護委員会（ＩＣＲＰ）は、勧告ごとにこのリスク係数をより大きな値に引き上げてきた。

2　発ガン

ガンの発生頻度と線量との間には、広島・長崎被曝生存者の白血病発生状況の調査などから直線的関係がある、と考えられている。ただし、低線量域ではかならずしも明白でない、とする指摘もある（二一〇ページ）。これらの調査の結果、各種の組織や器官で放射線によってガンの誘発されることが明らかにされている。

放射線による発ガン率と致死率とは同じものではない。発ガン率は、乳房＞甲状腺＞赤色骨髄＞肺の順であるが、致死率は、肺＞赤色骨髄＞乳房＞甲状腺の順である（ただし、男性の乳ガンは稀である）。

放射線以外の原因のガンによる死亡率は二五・二％とされている。仮に、放射線作業者が毎年、五〇ミリシーベルトの放射線を四〇年間浴び続けたと仮定して、これだけの被曝がこの人のガンによる致死率をどれだけ高めるかを計算すると、

4.0×10^{-2}/Sv（1Sv当たりのリスク係数）×0.05Sv×40年＝0.08

すなわち、八%となる。この数字は、この作業者のガンによる死亡確率が二五・二%から三三・二%に増加することを意味する。この数値はリスク係数の決め方によって変わってくる。

チェルノブイリ事故の晩発性障害の発生に関してロシア側は、一九八六年の事故当時に早発性放射線症と診断された一三四人のうち、その後一四人が死亡した、と報告している。この死亡には、ガンによる晩発性障害死も含まれていると考えられるが、自殺者や交通事故による死者もある、という。

また、白血病は、人口七一〇万人の放射性物質による汚染区域で、自然発生による死亡二・五万人（発生率〇・三五%）に対して放射線による死亡は四七〇人であり、自然発生数に対して一・九%（470/25,000×100）の増加であった、と報じている。

3　遺伝的影響

ヒトについての確かなデータは乏しいが、動物実験の結果から確率的影響とされている。

突然変異の誘発

放射線は、紫外線やある種の化学物質と同様、突然変異を引き起こす。突然変異には、遺伝

子に変化が生じることによる遺伝子突然変異と、染色体に異常が生じることによる染色体突然変異とがある。これらの突然変異は、致死的な、あるいは有害な結果をもたらすことが多い。自然界では一定頻度で突然変異が生起している。この自然突然変異と、放射線などで誘発される誘導突然変異は、質的に同一であり、両者を区別することはできない。

変異遺伝子プールの放射線による膨脹

遺伝子突然変異では、変異遺伝子をもつ個体は、この遺伝子による身体的疾患が原因で死亡したり、子孫を残す能力を喪失したり、あるいはこの能力を低められたりする。すなわち淘汰される。この場合、人類全体のような大きな集団で見た場合、変異遺伝子の総量（プール）は一定の大きさに保たれている、と見なされる。すなわち、このプールに流入する変異遺伝子の量と、プールから排除される変異遺伝子の量との間に平衡が成り立っている。ところが、放射線誘導突然変異によってこのプールに注ぎ込まれる変異遺伝子の総量がプールから除かれるそれよりも大きくなると、この平衡がくずれてプールが膨脹することになる。変異遺伝子の大部分は、外に現れない形（劣性の形）で集団内を何世代にもわたって拡散しながら、集団内のいたるところで奇形その他の疾患として発現する可能性がある。したがって、人類集団全体の資質を低下させないためには、集団全体の変異遺伝子のプールを増大させないよう努めることが

必要になる。

放射線の遺伝的影響は、人類集団が浴びた放射線の総線量に比例する、と考えられる。個人をとりあげた場合、それは生殖腺が浴びた線量と、将来作ると予想される子供の数とに比例することが容易に理解できよう。したがって、これから子供を作ろうという計画の人たち、特に若年層の人は、生殖腺線量を増やさないようにする必要がある。しかし、遺伝的影響の評価に際して重要なのは、個々人の被曝線量よりは集団全体の総被曝線量（つまりは集団に追加される変異遺伝子の数・突然変異の数）なのである。したがって、例えば日本人全体、あるいは人類全体といった集団が浴びる放射線の総線量（これを国民線量、集団線量などと呼んでいる）を可能な限り低く抑える配慮が必要となろう。

一九八二年の「国連科学委員会報告」によれば、人口一〇〇万人の集団において、この集団を構成する個人全員が一ラド（〇・〇一グレイ）という低線量の放射線を被曝した場合、次世代における遺伝的疾患は二二人増える、という。本態性糖尿病などの多因子性疾患を含む現在の遺伝的疾患は人口一〇〇万人あたり一〇万五九〇〇人なので、放射線による増加率は、22/105,900×100、すなわち〇・〇二％になる。このような被曝状況が毎世代続いて新たな平衡に達した世代においては、遺伝的疾患は一四九人に増え、現世代の〇・一四％の増加になるという。

第六章　身の周りの放射線

一　放射線源の普遍的存在

環境と放射線源

人類を含めすべての生物は何らかの「環境」の中に生きている。環境を離れては、生物やその営みである生命は存立しえない。

環境といった場合、普通は、人間の手が加えられていない、あるがままの自然の環境を指すが、ここでは人間がその営為によって作り上げた人工の環境も加えて考えてみよう。

この環境は、さまざまな要因から成り立っている。物理的要因としての温度・光・大気・水と並べただけでも、その複合的性格が十分理解できよう。人類はその活動によってこれらの環境要因のあるものの状態を変えてきた。原野や山地を開拓して農地を広げ、住居を建てた。それはすべて、人類にとってより暮らしやすい人工の環境を作ることを、根本の目的に据えており、このような自然改変は、人類の歴史の進歩にとってやむをえなかったろう。だが、人類は時として、勢いあまってこの自然環境を、その本来の目的を超えて傷つけてもいる。いわゆる

表6－1　種々の環境放射線源

放射線源	コ　メ　ン　ト	問題となる被曝
①種類		
自然放射線源(バックグラウンド＝2.4ミリシーベルト/年)		
地球外	宇宙線そのもの	体外
〃	宇宙線成分の中性子線によって生成するRI	体内
地球内	大地(地殻)中の天然RI	体外・体内
人工放射線源		
人工ＲＩ	(核エネルギーの暴発で生成するRIを含む)	体内＞体外
放射線発生装置	X線発生装置・加速器など	体外
②生活における被曝のケース		
[A]一般市民(限度値≦1ミリシーベルト/年 [医療被曝を除く])		
衣食住		
住居	建築材料	体外・体内
飲食物	天然および人工のRI	体内
空気	〃　〃	体内＞体外
高高度	宇宙線	体外
生活用品(機器類)	夜光時計・テレビ・火炎検知器	体外
医療		
診断	X線検診・アイソトープ(ＲＩ)検査など	体外・体内
治療	γ線照射・RI投与によるガンの治療など	体外・体内
[B] 放射線作業業務者（限度値≦50ミリシーベルト/年）		
職業的被曝		体外・体内
[C] 核エネルギーの暴発		
核兵器使用・実験，核施設・原発の事故*		
	近接地住民	体外・体内
	広域住民	体内＞体外

＊放出された放射性物質は気圏・水圏・地圏を問わず線源として環境中を移動・拡散する。とりわけ，空気・水・食物とともに人体に取り込まれた放射性物質による体内被曝の広域性が問題となる
RI（放射性同位体）は放射性核種と読みかえてもよい

環境破壊であり、これは規制されねばなるまい。

この自然環境の中に普遍的に存在し、それを構成している別の要因として、各種の放射線源から放たれる放射線が加えられる。宇宙から飛来する宇宙線と、地殻中の放射性核種が放出する放射線である。生物の存否にかかわらず、自然界には各種の放射線源が存在しており、いわゆる自然放射線の土台（バックグラウンド）を構成している。

ところが人類は、自らの手で作り出した人工放射線源からも、追加の放射線を浴びている。人工線源とは、人類がその生活レベルを向上させ、健康を保持することを目的として作った線源である。人類がとりわけ恩恵を被っているのは、医療面における放射線源と放射線である。X線検診やガンのコバルト照射などをあげれば十分だろう。日常生活を享受するために、カラーテレビから特定できない線量の放射線を浴びていることにも注目していただきたい。

どのような自然および人工の放射線源からの放射線を、どのような形で（体外からか、体内においてか）被曝しているかを表6－1にまとめた。その具体的内容について一瞥しよう。

二　自然放射線源からの被曝

自然放射線源は、宇宙と地殻とにある。自然放射線源から受ける世界の年間平均線量は、体

外被曝が〇・八ミリシーベルト、体内被曝が一・六ミリシーベルトで合計二・四ミリシーベルトとされている。

自然放射線源からの体外被曝は、透過力の大きい放射線によるものなので、被曝線量は体のどこでもほぼ均等である、と考えてよい。一方、体内被曝では、カリウムが赤色骨髄に、ラドンが肺に、ラジウムが骨に対してそれぞれ大きな影響を及ぼす。

自然放射線の線量は、地理的条件や生活条件によって左右される。海抜高度三〇〇〇メートルでは海面のほぼ三倍になるし、極地では低～中緯度地域と比較して一四％も高い。海と陸を比べた場合、陸地は岩石（特に花崗岩に含まれる鉱物からのγ線）のため放射線をより多く浴びる。また、岩石を建築材料とするコンクリートの建物の内部では、木造家屋に比べて一〇〇倍もの放射線にさらされる。

宇宙線

宇宙線には太陽起源の放射線と銀河由来の放射線とがある。

太陽由来の成分の中で最も多いのは、太陽面爆発後一～二日で地球に飛来する陽子線である。これは、地球の磁気モメントの影響で大部分が両極に降り注ぎ、オーロラ現象の一因となる。

一方、銀河由来の宇宙線は超新星の爆発などによってできるもので、一次宇宙線と二次宇宙

線に分けられている。

一次宇宙線は宇宙からやってくる放射線そのもので、その成分の相対強度は陽子線を一〇〇とすると、ヘリウム以上の重い粒子の流れ（放射線）：一〇、電子線：一、γ線：〇・〇一である。重い粒子の構成は、リチウム・ベリリウム・ホウ素で〇・二、炭素・窒素・酸素・フッ素で〇・六、周期律表のネオンから鉄までで〇・一で、その他ウランに至る全元素の原子が含まれている。

二次宇宙線は、一次宇宙線が大気に入射して二次的に作る放射線の総称で、その中に含まれる低エネルギーの中性子線が大気成分と反応して水素3、炭素14、クリプトン85などの放射性核種を作り出す。

宇宙線からの年間被曝線量は、体外被曝が〇・三五五ミリシーベルト、体内被曝が〇・〇一五ミリシーベルト、合計〇・三七ミリシーベルトとされている。宇宙線の強度は海抜高度に左右され、年間の放射線量は、海面でほぼ〇・四ミリシーベルトだが、高度一万メートルではほぼ四〇ミリシーベルトになる。

地殻からの放射線

これは、地球の誕生時から存在していて、その後地殻を構成するに至った放射性核種からの

放射線である。ウラン238のように、崩壊を続け最後に安定な鉛に変わる、いわゆる崩壊系列をなす核種と、このような系列をなさない核種とがある。いずれも半減期が長大であることが注目される。地殻からの年間の被曝線量は、体外被曝が〇・四五ミリシーベルト、体内被曝が約一・六ミリシーベルトで、合計ほぼ二ミリシーベルトであり、宇宙線による被曝線量の五倍以上になる。

四種類存在する崩壊系列のうち、ウラン238に始まるウラン系列は、崩壊の途上で一七種の放射性核種を生み出し、最後は放射能をもたない安定な鉛206で終わるが、この崩壊の途上に現れるラドン222は、気体のため大気その他の気体の成分になる。地殻から滲み出してくるラドン222の量は、キロベクレル／立方メートル／日で表すと、天然ガス：三、水：四、室外の空気：一〇、建築材料と建物の下の土壌：六〇である。フィンランドでの調査によれば、生活空間のラドンの量は、右記の単位で風呂場：八・五、台所：三、居間：〇・二で、水の使用量の多い箇所ほど大きい。地殻を構成するさまざまな天然放射性核種を特に多く含んでいるのは、火成岩の一種である花崗岩だ。建築資材に使う鉱物から放出される放射線の量は、木材に比べて一般的に高い。したがって、コンクリートの住宅では、木造家屋よりも被曝線量が高い。

地球上には放射線量が他の地域に比べて特に高い地域があちこちに分布している。中国の広東省、インドのケララ州、ブラジルのボコス・デ・カルドラスなどだ。それはその地域の地殻

に放射性トリウムの化合物である酸化トリウム（ThO_2）が含まれているためである。この化合物は、花崗岩に含まれるモナズ石（モナザイト）という鉱石に多い。これらの地域の住民は、世界の他の地域に比べて一〇倍もの放射線を浴びることもあるが、後述する（二〇九ページ）ように、過量被曝によって障害が発生しているという事実はない。

系列を作らない天然放射性核種のカリウム40からは年間、〇・三三ミリシーベルトの被曝がある。人体に含まれるこの核種の放射能を計算してみよう。カリウムが人体に占める重量を〇・二％とすると、体重七〇キロの成人では一四〇グラムとなる。カリウムには数種の天然同位体が存在するが、カリウム40の同位体存在比は、〇・〇一一七％である（九三・二六％は非放射性のカリウム39、六・七三％がやはり放射能をもたないカリウム41）。したがって、生体には一六・三八ミリグラムのカリウム40が含まれていることになる。この放射性核種の半減期を用いて計算すると、その放射能は約四・二キロベクレル（約〇・一一マイクロキュリー。一分あたり約二六万崩壊）となる。もし、人体に含まれるカリウム40をすべて集め、最近ではお馴染みになった感のある放射線測定器（放射能測定器ではない！）で測定したとするなら、レンジを最高にしても計器の針が振り切ってしまうだろう。人々の中には、計器が発するピー！という連続音に恐れをなして逃げ出す人もあるかもしれない。だが、雷で怖いのは雷光であって、雷鳴ではないことを思い起こしてほしい。

三　人工放射線源からの被曝

医療被曝

医療行為には、病気の有無を調べ、あるいは病気の原因を探る診察（検診・検査・問診）と、病気を治すことを目的とする治療とがある。両者を一括して診療という。

放射線による診療には、(1)放射線診断、(2)放射線治療、(3)核医学診断・治療の三つの分野がある。

〈放射線診断〉

ほとんどの市民が経験しているのが、X線による検査である。だが、X線が放射能をもった核種から出てくるγ線と同じ電離放射線であることを認識している人は意外に少ない。

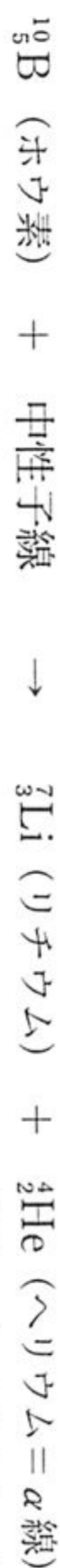
〈放射線治療〉

これは病気の治療を目的とする。

遠隔照射療法は、患者の体外から放射線を照射する方法で、線源は体外に設置され、体外で操作される。初期にはX線発生装置からのX線が用いられていたが、後にコバルト60、セシウム137、イリジウム192などからのγ線や、加速器で得られる高エネルギーの電子線などが加わった。「ガン組織のコバルト照射」という言い回しで、一般にも馴染み深いものになっている。

これに対して密封小線源を用いる方法は組織内照射法と呼ばれ、線源を直接患部にあてる。それゆえ病巣部との密着性が得られ、線源が少量ですむという利点がある。初期にはラジウム226、後にコバルト60、ヨウ素125、セシウム137、イリジウム192、金198などのγ線、イットリウム90のβ線、さらにはカリフォルニウム252の中性子線も用いられるようになった。管・針・ペレット・ワイヤ・ヘアピンなどいろいろな形状の線源が目的に応じて使用される。子宮ガン・食道ガン・口腔のガンには腔内照射法が、皮膚・口腔の表在性ガンに対しては密着（貼付）照射法が採られる。

中性子捕獲療法というのは、すでに述べた（五一ページ）ように、ガン組織に集まりやすい特殊なホウ素化合物を患者にあらかじめ投与した後、この化合物のホウ素に中性子線をぶつけて次のような反応を起こさせ、そのさい放出されるイオン密度の高いα線で脳腫瘍や悪性黒色腫を縮退させようという治療法である。すなわち、

$${}^{10}_{5}\mathrm{B}\ (\text{ホウ素}) + \text{中性子線} \rightarrow {}^{7}_{3}\mathrm{Li}\ (\text{リチウム}) + {}^{4}_{2}\mathrm{He}\ (\text{ヘリウム}=\alpha\text{線})$$

α線は飛行距離がきわめて短いので、病組織の外にまで達して健康組織を蝕む危険性は小さい、と考えられる。

〈核医学〉

一九五〇年代に入って、核医学という新しい技術が診断・治療のために登場した。非密封の

ＲＩを人体の中に投入するので、取り扱いには細心の注意が払われる。
核医学の診断は、脳・心臓・肺臓・肝臓・腎臓・甲状腺・副腎・骨などあらゆる器官に対して行われ、器官に応じてさまざまなＲＩが用いられる。例えば、心臓の検査法の心筋血流シンチグラフィーではタリウム201（半減期七二・九一時）や、最近ではテクネチウム99ｍ（同六・〇一時）などの半減期が短く（体内に入れても短時間で消滅する）、体外に出てくる透過性の高い、またエネルギーのそう強くないγ線を放出するＲＩが用いられる。
治療では、甲状腺機能亢進症（こうしん）（バセドウ氏病）やガンの治療にヨウ素131が（年少者には使用されない）、また慢性白血病・赤血球増多症にはリン32が用いられる。

〈医療による被曝線量〉
全世界の医療被曝によるガンの発生数は、一〇〇万人あたり二・五人とされ、このうちＸ線診断によるものが九〇～九五％を占めるといわれる。

生活用品からの被曝

われわれの生活環境の中に登場する放射性物質は、むき出しの状態ではなく、密封されて内部の放射性物質が逸出しないようにされている、いわゆる密封線源であるが、一つのサンプルあたり一〇〇マイクロキュリー（三・七メガベクレル）以下のものは法令の適用外、すなわち

放射性物質としての規制を受けない。したがって、通常の生活の中に登場し、一般家庭でもラジウムを文字盤に塗布した夜光時計を枕元に置いて寝た。そのため、放射線測定器の針が大きく振れるほどのγ線を頭部に浴びていたはずである。かつてラジウム226を時計の文字盤に舌で穂先を揃えた筆で塗って、骨組織が体内被曝を受けた女工（ラジウムペインター）の悲劇が思い出される（一〇三ページ）。今日ではこの核種は使用されず、体内被曝の危険度の高いα線やエネルギーの強いγ線などは放出しない水素3、プロメチウム147などが用いられている。火炎検知器や静電除去器などにも放射性物質が使用されている。

カラーテレビは電子電圧が高く、蛍光体からある程度X線が発生している。二メートル離れた位置で週五〇時間テレビを見ると、年間約二五ミリレントゲン（ほぼ〇・二五ミリシーベルト）になるという。テレビは、放射線源の分類からすると放射線発生装置の範疇に入るだろう。

放射線作業従事による被曝

現在、いろいろな職業分野で放射線を扱っている人は、厖大な数にのぼっている。

はるか昔の一五世紀末、チェコの鉱山で鉱夫の間に肺の奇病が多発したことがあり、五世紀後にそれがラドンによる肺ガンではなかったのか、とされた。今日でも、天然放射性物質の存在する鉱山で働く労働者は多い。しかし、鉱山そのものは法律の規制を受ける管理区域の扱い

は受けない。法律では、自然に存在する放射性物質についてはその濃度が一グラムあたり〇・〇一マイクロキュリー（三七〇ベクレル）を超えて初めて放射性物質と定義されているのである。原子力発電でエネルギー源として用いられるウランは、法律上は放射性核種の扱いを受けない希薄濃度の天然の放射線源を、最大級に濃縮して作った一種の〝人工〟放射線源である、ともいえる。

ほとんどの医療機関で、検診のためのX線発生装置を備えており、それを操作する医師・技師がX線を被曝する可能性がある。しかし現在のように管理が行き届いている状況では、往年の医師・技師あるいは看護婦を襲ったような悲劇が起こる気遣いはまずない。

原子力関係者もかなりの数にのぼる。原子力発電所やその燃料を生産する企業の作業員である。原子力施設で事故・事件は起こりうるものであるとするならば、そこでの作業員は最大規模の被曝の危険にさらされている人たち、といえるだろう。

RIの取扱者は、大学や官民の研究所などで多数研究に従事している。とりわけ非密封のRIを使用する場合は、体内被曝の管理がたいせつな課題となる。

全人類的規模の押しつけられた被曝

人類全体に、放射線被曝をもたらす危険性を秘めているのは、原子兵器の使用および実験、

そして原子力発電の運転といえるだろう。

〈原子兵器〉

人類の歴史上、原子兵器が使用されたのは一九四五年におけるアメリカの広島・長崎への投下だけである。三〇万人（現在でもその数字ははっきりしていない）を超える人たちの命を奪い、今なお、多くの人を後遺症で苦しめている。当事国はいまだにその非を認めようとしていない。

第二次世界大戦後、列強は自国の防衛を旗印に、核兵器の実験に狂奔した。一九五四〜五八年の主役はアメリカで、それよりは少ない規模ながら旧ソ連とイギリスも競争に加わった。この間、アメリカは自国から十分離れた南太平洋のビキニ環礁で初の水爆実験を行い、そのさい放出された放射性物質（いわゆる死の灰）を、近くの島に住む島民や付近を航行中のわが国の漁船の乗り組み員に浴びせた。一九六一〜六二年の期間は旧ソ連が主役になった。その実験場は現在はカザフ共和国のセミパラチンスクであった。一九六三年に大気圏内の実験を禁止した部分的核実験禁止条約が締結され、地下の核実験のみとなったが、一九六六年以降、フランスと中国はなおも小規模の実験を続けた。一九八〇年で核実験は終結したかに見えたが、九〇年代の後半に至ってフランスが太平洋で実験を再開し、さらにインドに続いてパキスタンが初の実験を行った。

一九六二年から一九六六年までにスペイン東部のヴァレンシアで測定された大気中の放射性

物質の量（ミリベクレル／立方メートル）は、一九六三年初めがピークで八〇〇、その後一九六四年の初めまでほぼ五〇〇の値を保った。その後の期間には五〇程度まで落ちたが、中国が大気圏内実験を行うたびに一〇〇前後に上昇した。そして八六年のチェルノブイリ事故によって三〇〇に上がった。

放射性降下物（フォールアウト＝死の灰）には、核分裂の直接生成物としてストロンチウム89、同90、ヨウ素131、セシウム137など、多種類の放射性核種が含まれているが、これらの放射性核種の中でとりわけ問題になるのは、半減期の長いストロンチウム90（半減期二八・七四年）とセシウム137（同三〇・〇四年）である。これらの核種は成層圏に上昇した後、長期にわたって地球の中緯度地域にゆっくり舞い降りてくる。

〈原子力発電〉

原子兵器と異なり、原子力発電は原子核エネルギーの平和利用を目的としている。しかし、正常運転時でも大気中には各種の放射性核種を放出する。すなわち、ガス状のものとして水素3、アルゴン41、クリプトン85、キセノン131、同133が、無機・有機の両化合物の形をとるものとしてヨウ素131などがあり、大気中の放射性物質のレベルをわずかながら上昇させる。

しかし、発ガンのリスクは、一〇〇メガワットの各種の発電所について比較した場合、原子力発電を一とすると、石炭による発電：三・九、石油による発電：〇・三五、天然ガスによる

発電：〇・二三であり、原子力発電は石炭発電に比べてむしろ低い、とする指摘もある。だが、事故時における環境汚染は、このような楽観論ではすまされない。それについては、次の章でとりあげよう。

第七章　暴発する放射線

一　核エネルギー利用における事件・事故

人類の経験した高線量・高線量率の放射線被曝は、産業、医療、研究そして軍事に放射能の現象を利用する、いわゆる核時代の幕開けとともに始まった。以下に述べるように、死を招くような致命的事件・事故はむしろ稀であったことがわかる。放射線にかかわる事件・事故の分類の仕方はいろいろ可能だが、被曝のもととなる線源の状態から、臨界事故、密封線源事故(事件)、原子炉事故に分類するのが、事件・事故を性格づけるのにはわかりやすい。また、全身被曝か局所被曝かの区分や、体外被曝か体内被曝か、民間人か作業員かの区分もなされてよいだろう。

本章ではまず、ネノという学者が一九八九年一二月までに全世界で起こった放射線関連の事件・事故を総括して一九九〇年に発表した論文の内容を紹介しよう。

1　多くの住民を引きこんだ事件・事故

ビキニ水爆実験（軍事目的）（一九五四）

一九五四年三月一日、アメリカが南太平洋マーシャル群島のビキニ環礁で行った水爆実験で、マーシャル群島のいくつかの島の住民と、近くの洋上を航行中の日本漁船第五福龍丸の乗員が放射性降下物（いわゆる死の灰）から放たれる放射線を被曝した。もっとも被曝量の高かったのは爆心地からほぼ一六〇キロ離れたロンゲラップ島の住民で、その六七名が受けた平均の体外被曝線量は、γ線が一・七五シーベルト、β線が足に二〇シーベルト（裸足で歩く習慣があったために高い）、頭部に三シーベルトだった。皮膚に障害が発生したが、死者はなかった。日本人船員二三名もほぼ同じ距離で、放射性降下物から実験当日に〇・八〜三・二グレイのγ線、顔面・頸部・手足にその一〇倍の線量のβ線を浴びた。六カ月後、船員の一人久保山愛吉が死亡した（直接の死因は肝臓障害）。

旧ソ連ウラル山脈南東地域（一九五七）

一九五七年九月二九日、旧ソ連のウラル山脈南東地域、正確にいえばチェリャビンスク・スヴェルドロフスク・チュメンスクの諸州を含む広い領域が、核廃棄物が空気中に放出された結果、汚染されるという事態が発生した。三〇年以上も機密にされていたこの事故は、一九四〇

年代に建造されたキシュチム核施設で起こった。高放射能の核廃棄物を収容したコンクリートタンクが冷却系の異常のために化学爆発を起こし、二〇〇〇万キュリー（七万四〇〇〇テラベクレル）の放射性物質が放出された。放射性核種の九〇％以上は、数カ月から一年という半減期の短い核種で占められていたが、五・六％はストロンチウムであった。二七万人が住む一万五〇〇〇平方キロの地域が、一平方キロあたり一〇〇ミリキュリー（三・七ギガベクレル）以上の汚染をこうむった。一週間以内に六〇〇〇人の住民が、そして一八カ月以内に一万人の住民が避難した。体外被曝線量の最高値は一七〇〇ミリシーベルト、体内被曝のそれは五二〇〇ミリシーベルトに達したとされる。一平方キロあたり一キュリー（三七ギガベクレル）の地域に居住し続けた非避難住民について、その三〇年間の実効線量当量は一二ミリシーベルト、骨髄線量が二五ミリシーベルト、骨線量が八〇ミリシーベルトと推定された。被曝世代での重い早発性ならびに晩発性障害、および次々世代までの晩発性障害の発生は見られなかった。

メキシコ・フアレス町とその周辺（一九八三〜四）

この事件は一九八三年一二月、メキシコのフアレス町の一帯で発生した。各二・六ギガベクレルのコバルト60のペレット（小顆粒）をほぼ六〇〇〇個封入した治療用ヘッドのシールが破損し、ペレットが廃棄物置場、輸送用トラック、周辺道路などに散らばったのである。その結

果、八週間以上の期間にわたって、住民七〇〇人が五〜二五〇ミリグレイ以上、五人が三〜七グレイの放射線を浴びたものと推定される。しかし、死者はなかった。この事態は翌年の一月、一台のトラックが金属スクラップから作ったスチール棒を積んで、たまたま誤ってアメリカのロス・アラモス国立研究所に迷い込んだとき、そこの感度の高い放射線検出器が明るみに出した。スチール鋳造業者が金属スクラップにこの放射性ペレットを混ぜて溶かし、スチール棒約五〇〇トンをアメリカに搬出していたのである。アメリカに販売されていた金属製テーブルの多くにもコバルト60が含まれていたが、その量は検出器にかかるほどのものではなかった。

チェルノブイリ（一九八六）

これに関しては、本章二でとりあげる。

ブラジル・ゴイアニア（一九八七）

一九八七年の九月一三日、ある医療機関が五〇・九テラベクレル（約一三八〇キュリー）のセシウム137を含む治療用密封線源を廃棄物業者へスクラップとして売却した。ところが、廃棄物業者はこの線源をのこぎりで解体してから運ぼうとし、そのおり線源の中から放射性核種と

ともに現れた一〇〇グラムのきらきら輝いてきれいな蛍光剤が子供たちを魔法の物質のように魅了し、彼らがそれで遊び始めた。その結果、放射性物質が飛散して人体内に入り、また衣服・床・壁・紙などに付着した。この事故は、同月の二八〜二九日に住民に放射線障害の兆候が現れ始めたときに明るみに出た。集中治療を必要とする被曝者が二二名に達し、三〜七グレイの放射線を浴びたものと推定された一〇名は危険な状態にあった。四・五グレイから六グレイ以上までの体外および体内被曝を受けた四名が事件から五週間後に死亡した。住民の検査を終えるのに同年のクリスマスまで、そして正常な生活環境が回復するには翌年の三月までかかった。すなわち、六七平方キロの面積、二〇〇〇キロに及ぶ道路網の八〇％が調べられ、高度に汚染された八五棟の家屋から二〇〇人が避難した。ゴイアニアから二〇キロ離れた地所に臨時廃棄物貯蔵所が設けられ、ドラム缶一万二五〇〇個などに封入された三五〇〇立方メートルの放射性汚染物約四四テラベクレルが回収・保管された。農作物の価格は一月以上の間、ほぼ四〇％下落したが、農作物に汚染はなかった。

2　少数の個人に大線量被曝をもたらした事件・事故

臨界事故

一九四五年から一九六五年までの期間に、臨界事故で総数八名が死亡している。臨界事故に

よる死亡率は、放射線関連の事件・事故の中ではもっとも高い。アメリカ・アイダホ＝フォールズでは一九六一年に、爆風による外傷で三名の研究員が命を落としている（放射線障害が直接の死因ではない）。

その後一九八三年まで臨界事故による死者はなかったが、この年アルゼンチン・ブエノスアイレスの近郊で、研究用原子炉の操作ミスのため、作業員一名が一四グレイの速中性子線および四グレイのγ線を全身に浴び、二日後に死亡した（なお、私たちの記憶に新しいが、一九九九年九月に日本の東海村で発生した事件で、主に中性子線を、致死線量を超えて被曝した作業員二名が死亡し、犠牲者が二名つけ加えられた）。

密封線源から高線量の放射線を全身に被曝した事件・事故

〈住民〉

メキシコで一九六二年、非破壊検査に使用するコバルト60の密封線源によって、住民が初めて被曝する、という事件が起こった。被曝した五人のうち助かったのは一人だけだった。次の事件は一九六三年に中国で発生したもので、六名の被曝者のうち二名が死亡した（八四ページ参照）。これら二つの事件は、コバルト60密封線源の杜撰な管理が原因だった。

それから一五年後の一九七八年、アルジェリアで住民二二名がイリジウム192線源から過量の

γ線を浴びた。そのうち五名の被曝線量は致死線量を超えていた。この事件は、一家族全員を四～六週間にわたって放射線にさらし、一名を死亡させた。

さらに規模の大きい事件が、一九八四年にモロッコで発生した。六〇〇ギガベクレル(一六・二キュリー)のイリジウム線源が一家全員(八名)の死を引き起こした。

先述したブラジル・ゴイアニアの事件は、密封線源の解体によって住民が被曝したきわめて深刻な事件だった。本来密封されているはずの線源が解体されて開封された状態となり、環境に散逸した放射性物質が、体外被曝だけでなく体内被曝の原因ともなったからである。

〈作業員〉

(1)イタリア・ブレーシア(一九七五)――工業用コバルト60線源からのγ線を骨髄吸収線量にして一二グレイ被曝した作業員一名が二週間後に死亡。

(2)ノルウェイ・オスロ近郊(一九八二)――経験三〇年以上のオペレーターが、殺菌用コバルト60からのγ線を、推定骨髄線量で二〇～二二グレイ被曝し、一三日後に死亡。

(3)中米エルサルバドル共和国首都サンサルバドル(一九八九)――工業用コバルト60線源からのγ線を、作業員三名が三～八グレイ被曝し、一名は右足切断、六カ月後に死亡し、他の一名は左足を切断された。

作業員に早発性障害をもたらした原子炉事故

一九七九年以前には、スリーマイル島の事故を除けば、原子炉事故は研究用原子炉でしか発生しなかった。死亡や急性放射線障害を引き起こした事故は次の通りである。

(1)ユーゴスラビア・ビンカ(一九五八)――作業員八名が被曝した(骨髄線量にしてγ線を二・五〜三・五グレイ、中性子線を一グレイ浴びたものと推定される)。五名が重体となり、全員に骨髄移植が初めて行われたが、一名は三二日後に亡くなった。

(2)アメリカ・アイダホ=フォールズ(一九六一)――先述のように、致死線量は浴びていなかったが、三名が爆風で死亡した。

(3)ベルギー・モル(一九六五)――一オペレーターが骨髄線量にしてγ線を五グレイ、中性子線を〇・五グレイ被曝した。オペレーターは死は免れたが、二〇〜五〇グレイを浴びた左足が切断された。

(4)チェルノブイリ(一九八六)――これは発電用原子炉に関しては、スリーマイル島に次ぐ第二の事故であり、死者をもたらした最初の事故である(後述)。

強い体内被曝をもたらした事件

先述のブラジル・ゴイアニアの事件は、住民の大きなグループに高度の体内被曝をもたらし

た例外的事件とされている。しかし一九六一年から一九八〇年までの二〇年間に、おもに放射性医薬品の取り扱いミスが原因の体内被曝による死亡がアメリカとドイツで一一例（うち九名は患者）報告されている。

結局この論文によれば、一九八九年までに原子核エネルギーの平和利用の作業で事故・誤操作による放射線の過剰被曝が主因となった早発性放射線障害で死んだ人の総数は、チェルノブイリの三一名（内三名は放射線以外の原因で死亡）の他に、作業員一三人（三名は爆風死）、住民三〇人であり、その他の既知報告例や調査漏れ、さらにはその後の犠牲者を含めても、今日までに総数で三桁の数字に達していないものと考えられる（晩発性障害による死亡数は含まない）。

二　チェルノブイリ原発事故

次に、『チェルノブイリの放射能と日本』（寺島・市川編著、一九八九年、東海大学出版会）および新聞などに記載された知見・情報にもとづいて、原子核エネルギーの平和利用の歴史に一時期を画したとされるチェルノブイリ原子力発電所の事故について、⑴事故の概要、⑵放出された放射性核種の種類と量、⑶それらが引き起こす早発性障害、および⑷発生すると予想される晩発性の障害を寸描しよう。

以下に記述することがらは、額面通りには受け入れがたい、とする向きもあろうが、この事故を風化させないためにも、また放射線障害についての認識と理解を深めるためにも、書き留めておく値打ちがあると思われる。

1 事故の概要

この事故は、一九八六年四月二六日、旧ソビエト社会主義共和国連邦の構成国の一つ、ウクライナ共和国の首府キエフの北北西一三一キロに位置するチェルノブイリ原子力発電所で起きた。事故地の北西約三キロに、住民が大きな影響をこうむった人口四万五〇〇〇人のプリピャチ市がある。この発電所には、黒鉛減速・軽水冷却・沸騰水型原子炉四基が設置されており、出力は、各一〇〇万キロワットであった。事故を起こした第四基は、一九八四年三月に運転が開始された。

事故は、発電停止時にタービン発電機の回転惰性によって電力がさらにいかほど得られるかをテストする、という実験中に起きた。その実験中に、原子炉の緊急停止システムや反応速度調整システムを作動させる措置を怠る、という重大な規則違反を犯したのだ。前日の二五日に実験が開始され、翌二六日午前一時二三分に出力が上昇して原子炉の減速材黒鉛が燃焼し、ガス爆発、水蒸気爆発、化学爆発によって原子炉が損壊し、放射性物質が飛散した。

直ちに多数の消防士が消火活動にあたった。その結果、近くの野外にいた一般人一人を含め、合計二三七名が過量の放射線を浴び急性放射線症の症状で入院したが、二八名が死亡した（他に三名が火傷・外傷などで即死）。二八名全員が骨髄線量で致死線量の六シーベルト以上を被曝した。一三名に骨髄移植が施されたが一一名が死亡、六名に胎児肝臓細胞移植が行われたが全員が死亡した。当時の新聞紙上には、二〇〇〇人即死という見出しが踊ったが、これは、露出された放射線源の近距離で作業などのできた人の数からも、また死亡の形態からも、起こりにくい事態と考えられる。

2　放出された放射性核種

放出された放射性核種の量

損壊した原子炉から五月六日まで放出された放射性核種は、地面に舞い降りてくる降下物質と、気体として空中を漂う希ガスとに分けられる。

五月六日の時点における降下物質は、半径三〇キロ圏で二〇〇〇万キュリー（七四〇ペタベクレル）、同以遠で一〇〇〇万～三〇〇〇万キュリー、計三〇〇〇万～五〇〇〇万キュリー、そして希ガスは五〇〇〇万キュリーで、降下物質と希ガスの合計は、ほぼ一億キュリーと推定されている。この数量は、列国の核実験の結果、大気中に放出された放射性物質の総量の二倍

に相当する。

〔注〕ペタ＝10^{15}。本章の数値には、わかりやすくするために、新単位のベクレル標記を旧単位のキュリーに、あるいはキュリーをベクレルに直して表した部分がかなりある。

放出された放射性核種の種類

希ガスのキセノン（原子番号五四）およびクリプトン（同三六）は損壊した原子炉から一〇〇％放出された。特に、五月六日までに放出されたキセノンの量は四五〇〇万キュリーに達し、放出された全放射性核種のほぼ半分を占めた。

これらの核種は気体として行動し、希釈され拡散する。地表面に降下し沈着しても、化学的に不活性な元素であるため土壌中の物質と化合物を作ることはない。キセノンは空気より重いので、水素のように大気上層部に逸散することはなく、地表近くの空気と混合し、吸気の一成分として人体に吸入される。体内に吸引されても生体の構成成分にはならず、呼気によって体外に排除されるものと考えられる。しかし、その一部が肺組織に吸着して体内被曝をもたらす他、体表面への体外被曝も問題となろう。ただし、キセノンの放射性核種の半減期は、もっとも長いキセノン131ｍでも一一・八四日である。

原子炉事故や原爆の爆発では、ウラン235の核分裂によって質量数がその半分ていどの放射性

核種が多種類生成する。その一つにヨウ素131がある。この核種の放出量はキセノンについで多く、七三〇万キュリーに達した。揮発性が高いために原子炉からの散逸率は二〇%に及び、残り八〇%が炉内に残った。この放射性核種は体内に入ると甲状腺に集まるため、その体内被曝の結果が問題になる。しかしその半減期は八日と短く、短期間で消滅に向かうものとされていた。ところが、後述する（一六二ページ）ように、とりわけ幼児・小児にガンを含む甲状腺障害が多発して問題となっている。

事故後取り沙汰された放射性核種にセシウム134（放出量五〇万キュリー、半減期二・〇六五年）および同137（同一〇〇万キュリー、同三〇・〇四年）がある。セシウムは食物連鎖を経て人体内に入りやすく、全身に分布し、その恒常的蓄積が問題にされたこともある。

ストロンチウムの放射性核種は、ストロンチウム89（放出量二二〇万キュリー、半減期五〇・五三日）とストロンチウム90（同二二万キュリー、同二八・七四年）であった。骨への集中率が高く、ストロンチウム90の方は物理的半減期だけでなく、有効半減期（一八・一年）も長く、しかも、β崩壊して生成するイットリウム90（娘核種という）が高いエネルギーのβ線を出すので、それによる体内被曝はきわめて危険とされている。

原子核反応の結果、プルトニウムの多種類の放射性核種が生成する。プルトニウムは肺に沈着し、一部は肝臓や骨にも入る。いずれも物理的半減期が非常に長く、プルトニウム238が八七・

七年、同239が二万四一一〇年、同240が六五六四年、そして同241が一四・三五年で、前の三つのプルトニウムの放射性核種は、生物学的排出に頼る以外、生体からのその減少を期待する道はない。どの核種もα線を放出するので、体内被曝による障害発生の危険度がきわめて高い。物理的半減期のもっとも短い四番目のプルトニウム241は、β崩壊してやはりα線を放出するアメリシウム241に転換するが、この生成娘核種は、その半減期が四三二・二年と親核種より長寿なので、親核種の短い物理的半減期に期待することはできない。放出されたプルトニウムの量は、プルトニウム241が一四万キュリーともっとも多く、プルトニウムのそれ以外の核種は全体で一万キュリー以下だった。

右に記載したもの以外に、各種の放射性核種約二四〇〇万キュリーが検出された。

放出量の時間的変化

第一段階では、原子炉の外部に大量の核分裂生成物が放出された。第二段階では、ホウ素(中性子吸収、核反応停止)・砂・鉛・ドロマイト(苦灰石〔マグネシウムおよびカルシウムの炭酸塩〕から成る岩石)などを大量に投与して炉を密閉したため放出量は減少した。しかし、次の段階で再度放出量が増加した。これは密閉によって温度が上昇したためである。最後に、熱に安定な物質を炉に投入して放射性物質と化合させたため、放出量の急激な低下を見た。

他の事故や核実験との比較

一九五七年に起きたイギリス・ウィンズケールの事故では、原子炉の性格が違うためヨウ素131の放出量はわずか二万キュリーだったが、チェルノブイリ事故ではそれが七三〇万キュリーに達した。一方、セシウム137は、逆にウィンズケールの一〇分の一に過ぎなかった。それまでのすべての大気圏内核実験で環境に放出されたストロンチウム90は一六〇〇万キュリー、セシウム137は三〇〇〇万キュリー、その他の核種を加えて総量で五〇〇〇万キュリーだったとされているが、チェルノブイリ事故はこの二倍の一億キュリーの放射性物質を放出した。

さて、この一億キュリーとはいったいどれくらいの〝目方〟があるのだろうか。放射性核種の〝目方〟はその半減期と質量数とから算出できる。したがって、個々の核種ごとに違う。今、一億キュリーが同じただ一種類の純粋の放射性核種によるものとして計算すると、ヨウ素131なら約八〇〇グラム（すなわち一キログラム以下）、ストロンチウム90なら約七〇〇キログラム、セシウム137なら約一一五〇キログラムとなる。

3　懸念される被曝

すでに第四章で、放射線被曝には体外被曝と体内被曝の二つの形があること、そして第五章では放射線障害に早発性のものと晩発性のものがあることを述べた。これらの内容について、

この事故の理解のために若干の記述を加えよう。

体外被曝

体外被曝の放射線源となるのは爆心地から飛んでくる放射性物質である。それは空気中を浮遊するか、あるいは地表に降下して土壌と混合したり、水に溶けてさらに移動したり、固体表面に付着したりする。いわゆる環境の放射能汚染である（なお、この場合の「放射能」は名詞radioactivityではなく、形容詞radioactiveである）。

こういう環境の中で放射線の被曝をできるだけ少なく抑える最良の方法は、線源から遠ざかることで、それは現在地から離れる、という方法で実現する。例えばX線診断による体外被曝の場合は一回の検査による被曝ですみ、被験者は照射が終われば直ちに照射室から退室できるが、これは「線源から離れる」ということのもっともわかりやすい例だろう。

しかし、周囲の環境が何種類もの放射性物質で汚染された現在地に留まらざるをえない場合、つまり線源と長期間にわたって接触を継続せざるをえない場合は、環境中の放射性物質が物理的減衰や他の場所への移動などによって消滅しない限り、継続的な体外被曝をこうむることになる。

体内被曝

放射線関連の事件・事故、あるいは核爆発実験後に人類の健康にとってもっとも憂慮されるのは、環境に放出された放射性物質が空気あるいは飲食物とともに人体の内部に入り、その結果引き起こされるかもしれない晩発性の障害である。このタイプの障害の実態がわかっていないこともあって、〝得体の知れない放射能の魔手〟が体をじわじわ蝕んでいくと感じている人が多い。事実、われわれにとって気になるのは、体外被曝よりも体内被曝の結末である。

放射性物質は何も特別の動きをする物質ではない。環境における物質の循環をごく常識的に考えれば、放射性物質も通常の物質と同様の経路で人体に入ることが理解できよう。入口は大まかに、口（食物や飲み物として）、肺（吸気として）、そして皮膚の傷口の三通りに分けることができる。固体や液体は経口経路が、そして気体ないしは揮発性物質は経肺経路が主である。皮膚を経由する経路はこれら二つの経路にくらべると狭い。

体内被曝を避けるもっとも有効な方法は、体外被曝の場合と同様、線源から離れること、すなわちできるだけ遠くに避難・移住することである。しかし、現在地に留まらざるをえない場合、つまり線源との接触が長期間にわたって継続するような場合は、環境中の放射性物質が物理的減衰や他の場所への拡散などによって消滅するまでの全期間、継続的な体外被曝を受けるだけでなく、その期間に体内に入り続ける放射性物質からの継続的な体内被曝をも受けること

になる。体外被曝と違う点は、放射線源がいったん体内に入ると、それから物理的に遠ざかることはもはや不可能になる、ということである。

ある時点で、ある一種類の放射性核種がある量だけ体内に取り込まれ、それ以降は環境からの摂取がないならば、体内被曝量は、さまざまな仮定を設けて推算することができる。しかし、環境から引き続き放射性核種を取り込む場合は、非常に複雑な経過を考えなければならない。放射性物質の体内量がその環境中の量の変化に応じて変動するからである。しかも、生体内に取り込まれる放射性核種は一種類とは限らず、何種類も存在することの方がより一般的である。そして、それぞれの核種について、生体内に入った核種が血液に移行する割合、血液中の核種が、例えば骨、骨髄、甲状腺などの決定器官に移行する割合、その核種の有効半減期、それが放出する放射線の種類やそのエネルギーなども考慮しなければならない。物理的崩壊の他に、放射性核種の新たな降下や移動などのために、それらの環境量が変動する場合もある。

4　晩発性の影響に関する専門家の考え方

ある一つの同じ社会的事象に関する見方が人によってまったく異なっているような事例はいくらでもあげることができる。原発の安全性という問題でも、マスコミが危険視する情報に対して専門家が楽観的な論評をするような場合が多い。

そこで、この道の専門家たちのこの問題に対する考え方の基本を、「核の廃絶」などといった政治問題や、「エネルギー資源」などの経済問題は絡めずに、この先の叙述のために一瞥しておこう。

次の事項のうち、(1)と(2)、および(3)の一部については、すでにとりあげた。

(1)放射線が人体に対してもたらす生物学的効果（影響）の原因となる量を、線量当量という尺度を用いて表す（六六ページ）。

(2)生物学的効果は確定的影響と確率的影響とに分けられる。後者の確率的影響は晩発性であり、被曝世代の発ガンと、世代にまたがる遺伝的影響とがある。これらに関係する線量当量を、実効線量当量という（七六ページ）。

(3)確率的影響が発生する可能性は、集団全体を対象として統計的手法で数量化され、この危険性の度合いが発生確率（リスク）として示される（一〇六ページ）。問題にされるのは、個々人が受け取った被曝線量ではなく、集団が全体として受け取った線量である（一一一ページ）。この線量を集団線量と呼び、シーベルト・人という尺度を用いて表す。例えば一〇〇シーベルト・人という標記は、ある集団全体（その人口は問わない）が一〇〇シーベルトを被曝したことを意味する。集団線量を集団の人口で割って得られる商が個人の平均被曝線量となる。

(4)ところがこの数字は、将来にわたって浴びるだろう放射線の線量を示したものではない。

本章二—3で述べたように、放射性物質がこの先もある期間にわたってその地に残留すれば、それが物理的に減衰して消滅するまでは被曝し続けることになる。そこで、ある集団が将来に負っている障害発生のリスクを評定するために、預託線量（線量預託とも。dose commitment）という尺度が設けられている。五〇年のように、十分減衰するまでの長い期間を考えることが多い。放射性物質は、新たな事態が起きない限り、時間の経過とともに指数曲線を描いて減少していく。この期間にある集団全体が負担するだろうと推定される総被曝線量が預託線量である。この値の大きい集団ほど、今後において障害発生のリスクは高い、と考えられる。

なお、私見であるが、預託線量という訳語はきわめて理解しにくく、〝貸し〟ではなく〝借り〟であることを考え、負債線量、あるいは単刀直入に〝借金〟線量とでも訳した方がわかりやすい。

5　事故後の各地における空間線量率と放射性核種濃度、影響の評価

半径三〇キロ圏

放射線は、遠方の火砲から放たれた弾丸のように長距離を飛んでくるのではない。火砲が飛んできて、至近距離から弾を放つ、といったほうがあたっている。この譬えを用いるなら、核種濃度は〝火砲の数〟に、空間線量率は〝弾丸の数〟にそれぞれなぞらえることができる。

事故発生地点から半径三〇キロ圏には、一三万五〇〇〇人の住民が住んでいた。三キロ北西に位置する人口四万五〇〇〇人のプリピャチ市では、事故の約三六時間後から大型バス一一〇〇台で住民の避難が開始され、二時間四〇分でほぼ全員を安全地域に移動させた。これは、爆風によって遠距離を運ばれてきた放射性核種からの放射線の被曝を避けるためである。

プリピャチ市における空間線量率は、事故当日の二六日の昼間はさほど高くなかったが、夕刻ごろから風向が変わって急上昇し、翌日の午前七時には一時間あたり一・六〜五・二ミリグレイに、同午後五時には六・三〜八・七ミリグレイに達し、この高い線量率が数日以上続いた。このまま五日間居住し続けたとしたら、これだけでほぼ〇・四〜一グレイのγ線を被曝したことになったろう。ただし、この線量でも急性死を引き起こすほどのものではない。

各地の空間線量率の測定値と各住民の行動調査にもとづいて、避難したプリピャチ市民の大部分の被曝量は、一五〜五〇ミリシーベルトと推定された。被曝線量が低かったのは早期避難のためである。一方、避難しなかった三〜一五キロの区域での住民の被曝量は、三五〇〜五四〇ミリシーベルト、さらに一五キロ以遠の一五〜三〇キロの区域でさえ四六〜六〇ミリシーベルト前後と、プリピャチ市の避難住民よりむしろ高かった。事故一カ月後のチェルノブイリ周辺地域のγ線線量率は、広い範囲にわたって一時間あたり数十〜数百マイクログレイのレベルにあった。

半径三〇キロ圏の全住民の平均被曝線量は一一九ミリシーベルトで、これは放射線作業従事者の年間線量当量限度の二・四倍である。ちなみに全住民の集団線量は、（135,000人×119ミリシーベルト＝）一万六〇〇〇シーベルト・人となる。また、一・七万人が自然にガンにかかるところ、事故による被曝のため、二七〇人（一・六％）弱の人が追加のガンにかかるとされた。

旧ソ連ヨーロッパ地域

人口七五〇〇万人を擁するこの地域では、事故後一年間の地域別の被曝線量は、ベラルーシ共和国南東部がもっとも高く、ついでロシア共和国ブリャンスク州、ウクライナ共和国中央部の順であった。都市部では、建築物のγ線遮蔽効果のために農村部より低かった。

発電所の南南東約一三一キロに位置するキエフ市では、事故後四日目の四月三〇日に放射性核種の降下量が風向きが変化したために急上昇した。五月一日から二日にかけてのわずかに二四時間だけで降下したセシウム137の総量は、一平方キロあたり三二〇ミリキュリーで、この値は、過去のすべての大気圏内核実験によって、北緯四〇～五〇度の、地球上でもっとも放射性物質が多量に降ったとされる地域一平方キロあたりの一七〇ミリキュリーを上回った。

一九八八年秋の時点で、避難措置のとられた半径三〇キロ圏の外側にも、一平方キロ当たり

のセシウム137の総量が四〇キュリー以上という地域が広がっていた。

体内被曝の原因となる飲食物中の放射性核種の量は、ベラルーシとウクライナ中央部で牛乳中のヨウ素131が一リットルあたり数十マイクロキュリーという高い値を示した。ベラルーシ・ゴメリ州ブラーギン地方の牛乳一リットル中に含まれるセシウム137の量（ナノキュリー）は、八六年に五九、八九年に二二、九〇年に一二（最高二四、最低八・五）だった。ゴメリ州住民が一人あたり一日に摂取したこの核種の量は、八六年七月に六〇ナノキュリー以上だったが、翌年六月には一五ナノキュリーに減少した。ちなみに八九年頃の日本人の場合は、この値が数ピコキュリー〔注〕程度だった。食品（牛乳・白パン・ジャガイモ）中のストロンチウム90の濃度は、一キログラムあたり事故前の一〇倍の二〇〜六〇ピコキュリーで、列国が核実験を頻繁に行った時期と同水準に達した。今後七〇年間の体内被曝線量は二八ミリシーベルトと推定された。この値は自然放射線源からの年間の体内被曝線量である一・六ミリシーベルトの七〇年分、すなわち一一二ミリシーベルトより低く、しかも、資料不足のため過大に評価されている可能性があるという。土壌から植物への放射性セシウムの移行吸収率は、腐植土の多い土壌では高いが、ウクライナやベラルーシの土壌がすべてこの種の土壌であると仮定して計算したためである、というのがその理由である。

〔注〕一マイクロキュリー＝一〇〇〇ナノキュリー＝一〇〇万ピコキュリー

旧ソ連以外のヨーロッパ

セシウム137の降下量は旧ソ連が全体の四四%を占め、旧ソ連以外のヨーロッパでは三八%だった。ヨーロッパ諸国における全セシウム（134と137）、およびヨウ素131の一平方キロあたりの総降下量の平均値は、最高値を示したオーストリアでそれぞれ約〇・六および三・二キュリーで、ついで、北欧・スイス・イタリア・西ドイツでかなり高い値が記録された。

旧ソ連以外のヨーロッパ諸国（人口四億人）の七〇年間の預託線量は六〇万シーベルト・人、そのうち旧西ドイツ（人口六一〇〇万人）では三万シーベルト・人とされた。旧西ドイツにおける放射線によるガン死亡数は、リスク係数を1.25×10^{-2}/Sv（ICRP一九七七年）として、

$$30{,}000\text{Sv・人} \times 1.25\times10^{-2}/\text{Sv} = 375\text{人}$$

（集団の預託線量）　（リスク係数）　（70年間のガン死亡数）

と推算された。ガンの自然死亡数は年間で一五万人、七〇年間では一〇五〇万人なので、

$$375/10{,}500{,}000\times100\fallingdotseq0.004$$

の計算から、自然死亡数に対して〇・〇〇四%の増加になる、という。

この数字を「……に過ぎない」と読むべきなのか、あるいは「……にもなる」と読むべきなのかが、「科学的」判断の難しいところである。リスク係数は仮定の設け方に左右され、それをどうとるかで、算出値が変動することにも注意しなければならない。

日本

日本への放射性核種の降下量は、オーストリアへのそれの、さらに一〇〇〇分の七と見つもられた。

集団線量は、ヨウ素131によるものが四四〇〇シーベルト・人、セシウム137によるものが四五〇シーベルト・人で、健康に影響がもたらされる可能性はきわめて低い。成人男子体内のセシウム137の濃度が、通常値の約六〇〇ピコキュリーから最高時には三倍に増加し、その蓄積を懸念する声もあったが、これは測定を一年後までで打ち切ったデータによるもので、その後の継続測定によって二年後にほぼ通常値にもどっていることが明らかにされた。乳児への影響については、一リットルに二九ピコキュリーの放射性核種を含む母乳を毎日一リットル飲んだ場合、乳児の被曝線量は一カ月で一六ミリレム（〇・一六ミリシーベルト）、一年では一九二ミリレム（一・九二ミリシーベルト）であり、問題ないという指摘があった。

チェルノブイリ事故後すでに一五年近くを経過するが、少なくともわが国に関しては、この事故によると考えられる晩発性障害の発症例は報告されていない。

6　マスメディアの情報

マスメディアの情報や、いわゆる〝世間の声〟の中には、従来の学問的知見と必ずしも符合

しないようなものもある。このような研究に携わっているある研究機関は、一部の人によって政府に迎合する出先機関だ、とまで決めつけられている。チェルノブイリ事故後に目にしたいくつかのマスメディアの情報を拾いあげて、その信憑性について考えてみよう。

家畜の奇形

一九九〇年の朝日新聞は、ウクライナ共和国ジトミル州ナロージチ地区で家畜の奇形発生数が事故の二〜三年後に急増し、例えば八本足のウマが生まれたと報じた（表7－1）。この情報については現地でも次のような半畳が入った。

表7－1　ウクライナ*の家畜の奇形発生数

年度	ウシ	ブタ	ウマ
1987	4		
1988	37	119**	
1989	10	28	1***
1990	2	2	

（朝日新聞〔1990年8月〕による）
＊ジトミル州ナロージチ地区
＊＊3～4代目　　＊＊＊8本足

①これまで隠していて話題にしなかっただけだ。
②ジトミル州の家畜はビタミンが少なく、もともと奇形が多かった。
③化学肥料や、事故後に散布した薬品のためだ。
④放射線のせいにするには、過去の奇形の発生数、被曝量の推測値、それにもとづいた発生確率の数字が必要だが、事故後の多発を主張するときにもち出される根拠は、「昔はなかった」

という獣医の発言だけである。
わたしたちの記憶にやきついているのは、八本足というとんでもないウマの子が生まれた、という情報だった。表のデータによると、事故後二年にウシとブタに奇形が多発していることがわかる。また、ブタは三〜四代目ということである。
①〜④の異議申し立ては、どれも一理あるように思われる。特に④の言い分は正鵠（せいこく）を射たものといっていいだろう。科学的判断というものは、可能な限り多くの事実に依拠し、政治的信条、宗教的信仰、道義的信念、経済的利害、感性や好みなどの個人的立場から離れてなされなければならず、これらの資料を提供した人も、そしてそれに反論する人も、それぞれの立場に左右されるのは好ましいことではない。同じことだが、取材にあたる人は、ある種の先入観をもって資料収集をしてはいけないだけでなく、申し立てられた異議の当否を今一歩突きつめて調べてみようという姿勢が求められる。事故の翌年の八七年についてブタの数字が提示されていないのは、単に調べなかったためなのか、実際に奇形がなかったためなのか、も知りたい。
それはさておいて、このような影響がどのような理由で現れたかを考えてみよう。
それには二つの場合が考えられる。
⑴一つは、ある代の親が受けた被曝の影響が次世代、さらにはその後の世代に伝達された、つまり、親の代の生殖細胞に生じた何らかの異変が遺伝された場合である。これは確率的影響

であるから、体外被曝にせよ体内被曝にせよ、原理的にはどんなに少量の放射線を親世代が浴びても、何らかの影響が後続世代に出現するリスクはある。そのリスクの評価は、④のような観点からなされる必要があろう。

⑵もう一つは、ある世代の雌親の母胎内ですでに発生中の胚あるいは胎児、すなわち次世代の個体が被曝した結果、奇形児となって出生する場合で、本書の放射線障害の分類では、晩発性の身体的障害に属する発生異常であり、遺伝的影響ではない。マウスの動物実験（九四ページ）では、器官形成期に二〇〇レントゲン（ほぼ二グレイ。ちなみにマウスの半致死線量は五・二〜六・七グレイという記載がある）の全身一回体外照射によってほぼ一〇〇％の新生児奇形がもたらされた。体内被曝の影響に関しては、さまざまな放射性核種について、動物にそれらをどの程度投与した場合に致死効果がもたらされるかを調べた実験はあるが、体内に摂取された少量の放射性物質が母胎内の胚あるいは胎児に及ぼす影響について評価するに足る十分な数量的データはまだない。

⑴あるいは⑵のいずれであるにせよ、当地の環境中に含まれる放射性物質がどのような性質のものであり、かつ家畜の世代ごとに、それらが量的にどのように変化したか、家畜が放射性物質にどの程度汚染されていた環境（畜舎）の中で、どのような餌で育てられたか、つまり、家畜が受けた体外および体内の被曝線量を評定するためのデータが、まず必要だろう。

脱毛

一九八八年末、チェルノブイリの南西四五〇キロの、ルーマニアとの国境に近いチェルノフツイという町で子供たちの髪の毛が抜け始めた、という情報が流れ、わが国で出版されたある本の中で実際あったこととして紹介された。しかし、その信憑性について次のような率直な疑問がもたれる。事故から約二年半を経過して発生したということだから、この脱毛は、

(1)事故から二年以上経過したあと、きわめて高度の体外被曝を受けて生じた早発性の障害、

(2)以前から長期にわたって、比較的低線量の体外被曝を慢性的に（継続的に）受けた結果として発症した晩発性の障害、

といった可能性が考えられる。それぞれについて検討してみよう。

(1)この種の脱毛は、頭部の皮膚に付着した、多量の放射性降下物による体外被曝が原因で起こると考えられる。体内に摂取された放射性物質によるのではない。この情報の紹介者によると、このチェルノフツイは、「最大量の死の灰が流れた経路にぴたりと当たっていて、死の灰を包んだ雲塊が、ルーマニアとの国境にあるカルパチア山脈にぶつかって最大量の規模の放射性物質が落ちただろうと見るほかのない場所だ」という。この説明には「時間の要因」についての言及はない。事故発生からある期間内なら、そのような高濃度の放射性物質が四五〇キロ（ほぼ東京－神戸間の距離）も離れた地点まで、途中希釈されることもなく、空気とともに、あ

るいは〝放射能の雲〟として運ばれた可能性も考えられよう。しかし、脱毛が発生したのは、事故から二年半後のことである。放射性物質の発生源である損壊した原子炉は事故後間もなく閉鎖されており、もはや有意量の放射性物質は出していないはずであるから、このような濃密な放射性の雲塊の流入が二年以上もの間続くことはありえない。事故から数年後にも異常に高い量の放射性物質の検出された箇所（いわゆるホット・スポット）が見出されているので、たまたま頭部に放射性物質の雲塊が〝命中〟して、ビキニ実験の被災者の場合のように、頭部がこのようなホット・スポットになったとしても、〝命中〟した放射性物質の量が脱毛を引き起こすほど多量だったとは考えにくい（早発性の脱毛は三シーベルト以上の体外被曝で起こる〔九二ページ〕）。これは全身被曝の半致死線量に相当する）。結局、最大量の放射性の雲塊がどこかに隠れ潜んでいて、事故から二年もたったあるとき、問題の地域に突然姿を現すという離れ業をやってのけた、とでも考えない限り、この事態は説明がつかない。さらに、この情報が正しければ、土壌その他の地上物も最大級の放射能を帯びているはずであり、当地の行政筋が事態の解明のための調査に乗り出したと思われるのだが、そのような調査結果の提示はない。

(2)長期の慢性的な体外被曝による晩発性の脱毛であった可能性はどうか。それが原因であるとすると、子供たちが雨や雪の日にも好んで野外に出て、高濃度の放射性液性降下物を頭部に長期にわたって繰り返し浴び続けたことになる。浴びたのが目に見えるダスト状の固形物、す

なわち文字通りの〝死の灰〟であったのなら、汚れたはずの頭部はすぐ洗浄するのが人間一般の生活習慣だろうから、被曝してもその影響が累積されることはなかったはずだ。慢性被曝による晩発性の脱毛は、かなりの放射線を長期にわたって被曝しないと起こりにくい（九三ページ）。この情報は、どれぐらいの数の子供が、どんな状況で被曝し、脱毛したのか、を伝えていない。また、近くに似たような地理的・気象学的条件下にある町や都市が少なからず存在するが、そこではこのような問題は起こらなかったのか、という素朴な疑問も湧いてくる。

この類の情報は、人々の心をつかまえやすい。かつて一九五四年のビキニ水爆実験（この実験を容認しているのでは断じてない！）ののち、〝放射能〟の雨があたると頭が禿げる、という風評が巷に氾濫し、多くの人がそれを信じて雨天の日に対処した。しかし、その後の半世紀もの間、脱毛が発生したという話は寡聞にして聞かれず、この声はいつの間にやら立ち消えとなった。そう多くない不確かな情報を、その真偽のほどを十分検証することなく、あらかじめ設定された判断や結論のためにのみ利用しようとすると、客観的な議論・検討は不要になり、人心を惑わすだけで終わってしまう。

甲状腺疾患

九〇年二月、オーストリアの日刊紙クリアは、ロシア正教会関係者などから聞いた話として

①「ベラルーシ共和国の首都ミンスク周辺でここ数カ月の間に六〇〇〇人が甲状腺ガンで死亡」と報じた。この報道の真偽に関して同市の放射線医学センター所長コルイトコ氏は、②「それは大嘘である。症状の重い三〇〇人（大半は子供）のうち二一人が甲状腺ガンと断定され、摘出手術を受けた。しかし死者はない」と取材にあたった朝日新聞の記者に答えた。それから六年後、ロシアの医師団は、③〇～一五歳の子供八〇〇人に甲状腺ガンが発生し、そのうち三人が死亡、多くは早期の発見と治療で助かった、と報告した。以下に述べるような医学的知見や、事故時からの経過時間を考えると、これらの情報のうち信憑性があると見なせるのは②および③であり、①のような事態が起こるとは考えにくい。

放射線による甲状腺ガンは、体外から浴びた放射線のほかに、体内に摂取された放射性ヨウ素131による体内被曝も原因になると考えられる。この放射性核種の体内における消長についての従来の医学的知見には次のようなものがある。

成人の場合、摂取されたヨウ素の大部分（七〇～八〇％）は一～二日のうちに尿中に排泄され、残りが甲状腺に集まる。物理的半減期が約八日なので、体内に入っても速やかに崩壊・減少する。一方、生物学的半減期は、日本人が三五日、米国人の場合は成人で八〇日（一〇歳児三〇日弱、三歳児以下は一〇日以内）とされる。ＩＣＲＰはこれを一二〇日としている。有効半減期は、日本人では六・五日となるが、ＩＣＲＰによれば七・五日である。人体がヨウ素を排

出する速度は、民族や年齢、さらには個人によって異なっており、それゆえヨウ素の放射性核種を用いる核医学の診断・治療にあたっては、個々人についてあらかじめ予備調査がなされる。

甲状腺は胎児の場合三カ月までは機能していない、つまりヨウ素の摂取率はゼロである。五カ月で〇・三%、六カ月で一・〇%、臨月期で二・〇%と上昇し、乳児期に四〇%と激増し、その後低下して、六〜七歳で成人のレベルまで落ちる。

ヨウ素の放射性核種一キロベクレルが摂取された場合の被曝線量（ミリグレイ）は、ヨーロッパ人について一五歳で〇・五九、一〇歳児〇・八一、五歳児一・四、一歳児三・〇、〇歳児四・三、一方、日本の成人について〇・二という数値が見られ、同一量のヨウ素が摂取された場合でも、〇歳児の甲状腺は成人の約二〇倍の被曝を受けることになる。

次にいくつかの実際の疫学的データを記そう。

(1)治療のためX線の体外照射を受けた人たち（アメリカ）

一九三〇年代にアメリカで、胸腺リンパ体質（乳幼児の突然死を引き起こすとされた症状）の治療のため、胸腺に数グレイのX線を照射するという療法が採用されたことがあった。これは、患者側から見れば体外被曝であり、胸腺に近い甲状腺もX線を浴びる。この治療を受けた二八二七人を、放射線を浴びなかったその兄弟姉妹五〇五五人を対照として調査したところ、甲状腺ガンの発生頻度は照射を受けた人で明らかに高いことがわかった。これを一万グレイ・人・

年に直すと、すなわちある集団が全体で一年間に一万グレイ被曝したとすると、その中の三人に甲状腺ガンが発生することになるという。

(2)広島・長崎原爆被災者（日本）

これも体外被曝が甲状腺ガンの発生に及ぼすだろう影響に関する調査である。被曝した放射線の主体は広島が中性子線、長崎がγ線である。被曝線量①〇・〇一グレイ未満（一六万二七〇〇人）、②〇・〇一〜〇・四九グレイ（六万五三〇〇人）、③〇・五グレイ以上（八万三七〇〇人）について、通常の非被曝者集団に発生すると考えられる期待数に対する被曝者での実際の観察数が調べられ、①差なし、②約一・七倍、③約五・四倍という結果が得られた。これらの結果を一万グレイ・人・年に直すと一・八九人となり、男女差については、男性〇・九二人、女性二・四〇人となって、女性がかなり高かった。

(3)甲状腺疾患の核医学的治療（アメリカ）

これは甲状腺機能亢進症（バセドウ氏病）の治療のため、放射性ヨウ素131を患者に投与し、それが放出する放射線（β線）で甲状腺の機能を適度に低下させる方法である。患者の甲状腺は高度の体内被曝（数十〜百グレイ弱）をこうむる。放射線治療を施した場合は二万一七一四人中二八人（発症率〇・一三%）、手術による場合は一万一七三二人中五四人（同〇・四六%）、抗甲状腺剤を投与した場合は一一四四人中四人（同〇・三五%）に甲状腺ガンが発生し、手術

や薬剤よりも放射線がガンの発生率を高める、という証拠は得られなかった。

(4)甲状腺疾患の核医学的診断（スウェーデン）

甲状腺疾患の診断のためにヨウ素131を患者に投与し、体外に出てくるγ線を診断に利用するという方法で、(3)と同様、この場合も主にβ線による体内被曝がもたらされる。投与される放射性核種の量は二・二メガベクレル（約六〇マイクロキュリー）で、この量は、(3)の核医学的治療に用いられた量の数十分の一〜百分の一（線量で約一グレイ）に相当する。一万一三三三人についての調査結果は〝白〟だった。

(5)ネバダ核実験（アメリカ）

ヨウ素131から放出される放射線を〇・三〜二・四グレイ、平均一・二グレイ被曝したと推定される子供一三七八人では、良性の甲状腺腫瘍六人、ガン〇人であったのに対し、被曝しなかった子供一三一三人では、良性六人、ガン一人で、結果はやはり〝白〟であった。

(6)マーシャル群島水爆被災住民

住民が大量の死の灰にさらされ、成人で二・二〜四・五グレイ、四歳児は七〜一四グレイの放射線を甲状腺に浴びたとされる。胎児四例、女性一三〇人を含む二四三人のうち、二二年間に七名の甲状腺ガンが発見されたが、発生リスクは、一万グレイ・人・年あたり三・五人だった。発ガン患者はすべて女性で、(2)の場合と似た結果が得られた。

右記の(1)および(2)は典型的な体外被曝、(3)および(4)は典型的な体内被曝による甲状腺ガン発症例の調査と見なしうるが、これらの調査から体外被曝は体内被曝に比べてガンを誘発しやすい、といえよう。甲状腺はコロイドの充満した濾胞と、それらをとり囲む細胞とから成り立っている。体外被曝では濾胞も細胞も透過力の大きい電磁放射線や中性子線にさらされるが、放射性ヨウ素を体内に投与した場合は、それが濾胞の内部に集まり、放出されるβ線が濾胞外部に位置するところの、ガン組織に発達する細胞にまでは到達しないことが、このような差の原因だろう、と説明されている。

さて、最初に述べたように、チェルノブイリ事故から一〇年後にロシアの医師団は、〇～一五歳の子供八〇〇人に甲状腺ガンが発生し、そのうち三人が死亡、多くは早期の発見と治療で助かった、と報告した。これは実のところ、従来の医学的知見からすると、少なからず高い数字であり(これでも過少報告であり、実際はもっと高い、とする向きもあろう)、放射線医学に対して一つの課題を突きつけている。特に、ヨウ素131は物理的半減期八日、生物学的半減期一二〇日、有効半減期七・五日(ＩＣＲＰによる)で、体内に入っても割合早く姿を消すはずであるとされ、また右に述べた体外被曝および体内被曝の両面での疫学的調査の結果からも、この問題を楽観視する傾向があった。しかし、発ガンを含む甲状腺障害の多発という事実は、乳幼児や少年の甲状腺の放射線感受性が、これまで考えられていたのよりは明らかに高いことを示している。

第八章　ヒト以外の生物では

一　生物界における放射線感受性の多様性

第七章までは、主にヒトの放射線障害を扱った。ここで、その他の生物に目を転じよう。

多様性の諸相

生物の放射線に対する感受性（逆にいえば放射線に対する抵抗性）は、あまりにも多様である。カビの一種ヒゲカビの胞子柄は、わずか〇・〇〇一レントゲン（一レントゲンはほぼ〇・〇一グレイとしてよい）をあてただけで成長が停止する。しかし、ハエは八万レントゲンを照射しても正常に飛翔し、食餌する。ゾウリムシの属する繊毛虫類は、三〇万レントゲンという高線量を浴びせてやっと死ぬ。単細胞緑藻類のクロレラは、一〇〇万レントゲンで〝病気にかかる〟ことはあっても、死にはしない。

細菌の一種、ミクロコッカス・ラディオジュランスの種名は「放射線に耐える」の意味であるが、その半致死線量は二六万レントゲン、同じ意味のラディオトレランスという名称をもつ

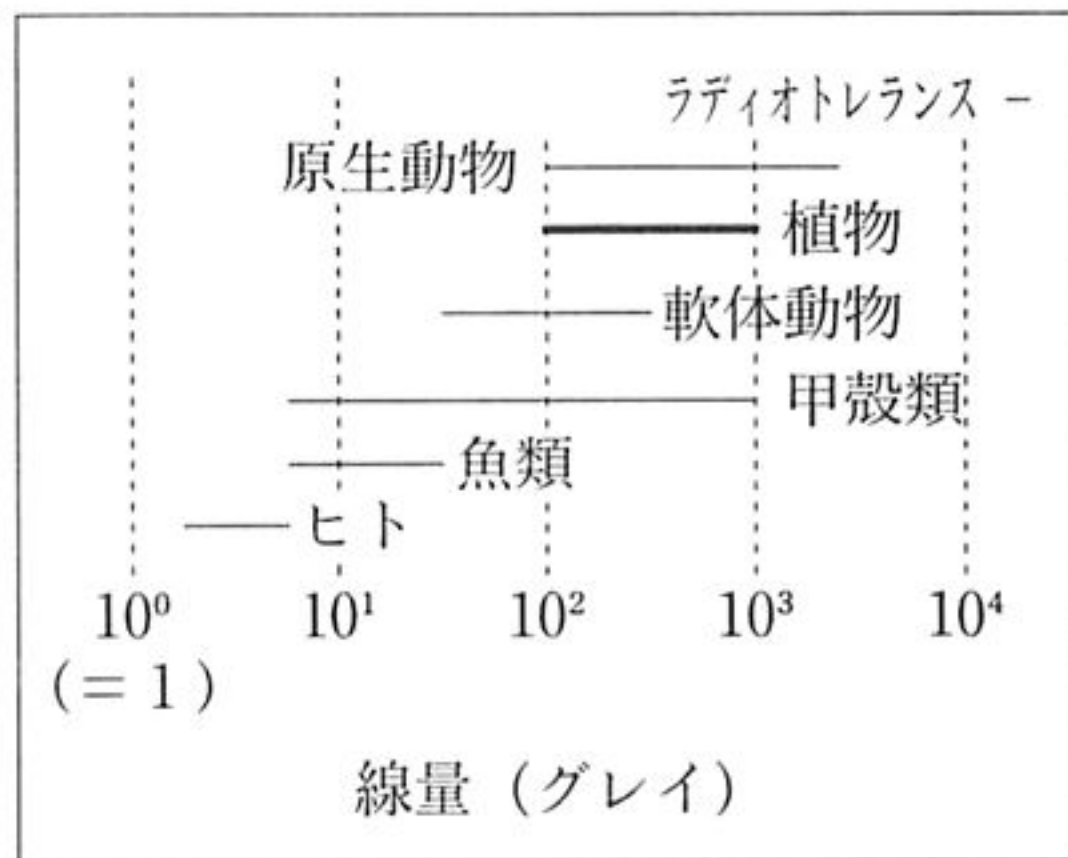



図８－１　いろいろな生物の半致死線量

ある種の細菌のそれは二〇〇万レントゲンである。しかし、上にはさらに上がある。プソイドモナスに属するある細菌は、ロス・アラモスの原子炉の水の中で八時間に一〇〇〇万レントゲンを浴びたのに、水を濾過するイオン交換樹脂を食べて繁殖していた。このような高い線量では、いやそれよりはるかに低い線量でも、生体外に取り出したタンパク質や核酸の分子が変性したり切断されたりするのに、この細菌はなぜ生きていけたのだろうか。

これ以上に私たちを驚かすのは、同一個体の同一細胞の放射線感受性が発生の進行に伴ってはげしく変化することである。植物の根端細胞は三〇レントゲンで分裂が停止するが、その翌日、この細胞に由来した、根端から一センチ離れた箇所に位置する細胞の伸長を止めるには、二〇万レントゲンを照射する必要がある。分裂と伸長という別の生物活性を指標にとったとはいえ、一日の間に放射線感受性が約四桁ほど低下したことになろう。

生物グループの間の差

図８－１は、いくつかの大きな動物グループの間に高等植物（維管束植物）や高放射線抵抗性の細菌を挿入し、それらの半致死線量域を比較したものである。一般的傾向としてであるが、動物では高等なものほど感受性が高く、高等植物は動物よりも放射線に強いことがわかるだろう。高等植物の分類群間に見られる感受性については、調査した研究者によって異なる数値が得られているとはいえ、ごく一般的に次のようなことがいえそうである。

⑴裸子植物は被子植物に比べると、放射線に弱い。
⑵被子植物の中では双子葉類が単子葉類よりも抵抗性が大である。
⑶双子葉類の中ではアブラナ科がきわめて放射線に強い。
⑷科のレベルでは、イネ科∨マメ科∨アブラナ科のように、感受性が科の間でわずかながら違う傾向もうかがえるが、同じ科に属する種の間で（また、同一種の中の品種間でさえ）、大きな格差の見られる例がたくさんある。

多様性の原因

放射線感受性の多様性がどのような原因でもたらされるかについて、その答えを示唆していると考えられるいろいろな研究を次に紹介しよう。しかし、その一般法則を求める試みはまだ

成功していない。

①代謝活性

それを生物の代謝活性（体温）に求めようとする試みが以前からある。

ある種のカエルを二三度に置いて三〇〇〇〜六〇〇〇レントゲンを照射した後、引き続き同じ二三度の温度に置くと、カエルは放射線障害を起こして三〜六週以内に一〇〇％死んでしまう。ところが、カエルをそれよりもずっと低い五度の温度に移して代謝活性を抑えてやると、九〇％のカエルが三〜六週間も生きている。しかし、二五度に戻せば全部のカエルが死亡する。スースリクという齧歯（げっし）類に属する冬眠動物がある。この動物に、その冬眠中に放射線を照射しても障害は現れない。しかし、冬眠から覚め、餌を求めてあちこち動きまわると各種の障害が現れてくる。

だがこの考えでは、代謝活性（体温）がヒトではラット・マウス・鳥類より低いのに、放射線感受性はヒトの方が高い、という事実を説明できない。

②ある種の化学物質

ある種の高抵抗性昆虫の体液中に特殊なアミノ酸が多量に見出され、それが高い抵抗性をもたらしている、という示唆がなされた。実際、アミノ酸のシステインにそのような放射線防護効果のあることが知られている。植物ではアスコルビン酸の含量と関連づける試みがなされた

ことがあったが、うまくいかなかった。アブラナ科の植物の高抵抗性は、この科特有の代謝産物シナーピンが含まれているためである、とするデータがある。これは、シナーピンのようなフェノール性化合物が、放射線照射によって細胞内に生成する活性物質（ラジカル）を除去する能力をもっていることと関係があるらしい（一八三ページ）。

③染色体やＤＮＡ

⑴生殖細胞の一組の染色体（ｎ本）の整数倍になっているものを倍数体と呼ぶが、染色体数の違うコウボの放射線抵抗性は、一倍体（ｎ本）≪二倍体（２ｎ本）＜４倍体（４ｎ本）の順で大きくなる。すなわち、抵抗性は染色体の組の数が多いものほど高い。

⑵染色体の容積——一六種の植物について、核容積／染色体数（これを染色体の容積と仮定するが、それには問題あり）の値を調べたところ、それが大きいほど放射線感受性が高かった。

⑶損傷ＤＮＡの修復能——単細胞藻類クロレラでなされた実験では、通常の仲間と放射線抵抗性の仲間とでは、損傷を受けたＤＮＡの修復される速度が、抵抗性の仲間でより高いことが示されている。後述する（一九九ページ）ように、生物は傷ついたＤＮＡを元の状態に戻そうとする能力を備えている。

⑷ＤＮＡの細胞あたりの量——いくつかの大きな生物グループ間では、放射線感受性が細

胞あたりのＤＮＡ量の増加とともに増大することが認められる。これは放射線に対する感受域が増加するためであろうと考えられる。一般的にいえることは、この量が下等な生物では小さく、高等になるほど大きくなることである。放射線障害をきわめて受けやすいヒトでは、この量がいちじるしく大きい。

先述のように、高等植物では被子植物双子葉類、被子植物単子葉類、裸子植物の順序で放射線抵抗性（放射線感受性）が小さく（大きく）なるが、抵抗性の高い方の双子葉類で一細胞当たりのＤＮＡ量が一般的に少なく、一方、感受性の高い裸子植物でそれが多い。

しかし、生物の大きなグループ間の感受性差はこれで説明がつくが、小さな分類群、例えば科の間や、同一科の種の間に見られる感受性差は説明できない。

二　高等植物に見られる質的に多様な放射線障害

ここで、これまであまり話題にされていない植物の放射線障害の様相について述べよう。チェルノブイリ事故の後、事故地点に近い地域に異常な形の植物が観察された、という報道のなされたことが記憶に新しい。植物も細菌類や菌類、動物、ヒトなどと同様、生物の仲間である。

表8－1　植物の成長と発生の放射線による形態的変化*

器官	量的変化(成長)**	質的変化（発生）**
茎	成長の促進・抑制	茎端分裂組織の脱落，断面の形状変化，葉序（葉の茎への着き方）の乱れ，頂芽優勢の消滅と腋芽の発生，気根の発生，二叉分枝，腫瘍形成
葉	大きさと数の増・減	非対称化，形状変化，葉身の変化(肥厚・癒着・偏平化・脱落)，葉脈の乱れ，腫瘍形成，葉緑体の巨大化
根	成長の促進・抑制	根端分裂組織の脱落，主根の脱落，側根の欠失，二次主根の形成，屈地性の乱れ，腫瘍形成
花	数の減少，大きさの増・減	開花の加速・遅延，花の落下，形状変化，花色の変化，不稔，腫瘍形成

＊主に高線量照射の場合　　　　　　（グッドコフ〔1985〕による）
＊＊量的変化での促進・抑制，増加・減少，そして質的変化での，例えば開花の加速・遅延は，線量に左右される

だが、高等動物で用いられているいろいろな概念を植物にそのままあてはめるのは、かなり困難であることを指摘する必要がある。これは、体制（organization）や体のできかた（発生の様式）が動物と植物とで根本的に相違しているためである。

表8－1に、主に植物の芽生えに対して放射線を浴びせた後に、植物の器官とされる茎・葉・根・花の成長と発生とに現れてくる変化を示してある。この表から、生体系の量的面（成長）よりも質的面（発生）に放射線の影響が強く現れる、という事実がわかる。例えば葉に誘起される障害は、非対称化、形状変化、葉身の肥厚・癒着・偏平化・脱落、葉脈の乱れ、腫瘍の形成、葉緑体の巨大化など、まことに多様だ。

その理由は次のように考えられる。高等動物の幹細胞（七〇ページ）に相当する細胞集団は茎・根の頂端部に位置する分裂組織細胞であり、その放射線感受性は動物の場合と同じようにきわめて高い。この部分が放射線を浴びると、互いに異なる遺伝情報を誘導された細胞または細胞群ができ、それらが相互に分離・独立した状態で相互に規制しあうことなく発生し、その結果、このように多様な質的変化が現れるのである、と。

芽生えに高線量の放射線を照射すると、茎端部および根端部は、その細胞が分裂能を失い、一週間以内に褐色化して枯死する。このような状態の植物をガンマ小植物と称し、分裂細胞を欠いた、すなわち、もはや分裂能力をもたない永久組織だけからできている、したがってもはや成長しない植物〝個体〟の生理機能を研究するのに好都合な材料となる。

放射線植物学の草分けともいうべきスパロウという研究者が一九七〇年、慢性照射が植物の寿命に及ぼす影響に関して発表した論文は、書き留めておく値打ちがある。彼はその共同研究者とともに、木本（もくほん）の被子植物七種、裸子植物六種を苗木の時期から八年の間、ガンマフィールドというγ線を連続して照射できる圃場（ほじょう）に置いた。ガンマフィールドでは、植物を線源から一定距離の位置に植え、一定の線量率で照射しながら成育させることができる。その結果、三年目に死をもたらすような線量率は、被子植物が三二・五〜一三二レントゲン（〇・三二五〜一・三二グレイ）／日、裸子植物が七・二〜二九・四レントゲン／日で、裸子植物は被子植物

に比べ慢性照射でも放射線に弱いことが示された。実験終了までに植物が受けた総線量は、一日に一〇〇レントゲンとすると、三年間では一〇万レントゲン（≒一〇〇〇グレイ）以上になることに注目していただきたい。動物に対して植物は、慢性照射についても放射線に強いのである。しかし、その理由の納得できる説明は、まだない。

　植物に対する放射線の作用の研究は、放射線生物学の黎明期から戦後の二〇年ぐらいの期間には活発に行われ、数多くの注目に値する論文が発表された。戦後の期間には、一流の科学誌といわれる『ネイチャー』を賑わした。ところが、一九七〇年代を境に研究は足踏み状態となった。かつて、『放射線植物学』（Radiation Botany）という専門誌に多数登載された植物関連の論文は、この学術誌が廃刊となって、それを引き継ぐ形で発刊された『環境と実験の植物学』（Environmental and Experimental Botany）という専門誌の「環境」の部分にわずかな紙面を占めるに過ぎなくなった。放射線は植物にストレスを引き起こす「環境要因」の一種であるという扱いである。この学術誌に登載されるものを含め、全世界で発表される植物関連の〝骨のある〟論文は、最近では年間に一〇編ぐらいに減少した。ヒトや動物に関する研究論文に比べると、文字通りほんの一握りといっても過言ではないような現状であり、この現状が改められそうな気配は、今のところない。流行の最先端が追われがちな学問の世界に数多く見られる不思議の一つである。

第九章　障害が現れるしくみ

一　わずかなエネルギー・大きな効果（影響）

著書によって記載値がかならずしも一致しているとはいえないが、X線・γ線によるヒトの致死線量は、八〜一〇グレイ程度とされている。ヒトの生命を奪うこれだけの放射線を浴びたとき、体温がどれほど上昇するかを計算してみよう。

一グレイとは、一キログラムの被照射対象への一ジュールのエネルギー付与である。このエネルギーは、熱量の単位カロリーで表すと〇・二四カロリーに相当し、一〇グレイでは二・四カロリーとなる。水一グラムの温度を一度だけ（厳密には一四・五度から一五・五度に）高める熱量が一カロリーであるから、これだけの熱量で一キログラムの水が高められる温度は、

$$2.4 \div 1000 = 0.0024$$

となる。すなわち、この物体の温度上昇はわずか〇・〇〇二四度である。生体は水として扱うことができるとすれば、致死線量の放射線を浴びるときに生体に吸収されるエネルギーは、熱いお茶を一杯飲んだときと変わらないほどわずか、ということになる。

致死線量の一〇グレイの放射線で、細胞を構成する全分子のうちどれぐらいの割合の分子が損傷を受けるかについて、次のような計算を試みた学者がある。

一グレイの吸収線量によって一立方ミクロン（一立方センチの一〇の一二乗分の一）の細胞体積中に生成するイオン対の数は、二〇〇個ほどとされている。一個の細胞の容積を五〇〇立方ミクロンとすれば、細胞全体では生成イオン対の数は一グレイにつき一〇万個、一〇グレイでは一〇〇万（10^6）個となる。仮に細胞の分子数を10^{12}個とすると、損傷を受ける分子の割合は、（$10^6/10^{12}=$）10^{-6}となる。すなわち、細胞全体の分子のうち、わずか一〇〇万分の一が傷つけられるに過ぎないことがわかるだろう。

これら二つの、かなり乱暴な計算結果からも、生体系が放射線を浴びると、細胞内に起こった初期の変化を増幅するような機構が次の段階で作動しだすこと、または生物学的に重要な、いわば細胞の急所となっている、あるいは生死の鍵を握っているような分子が損傷を受けるだろうことが考えられるわけである。

二　放射線効果が現れるまでの過程

放射線を照射された生物に認められる変化を「放射線効果」と呼んでいる。この効果が現れ

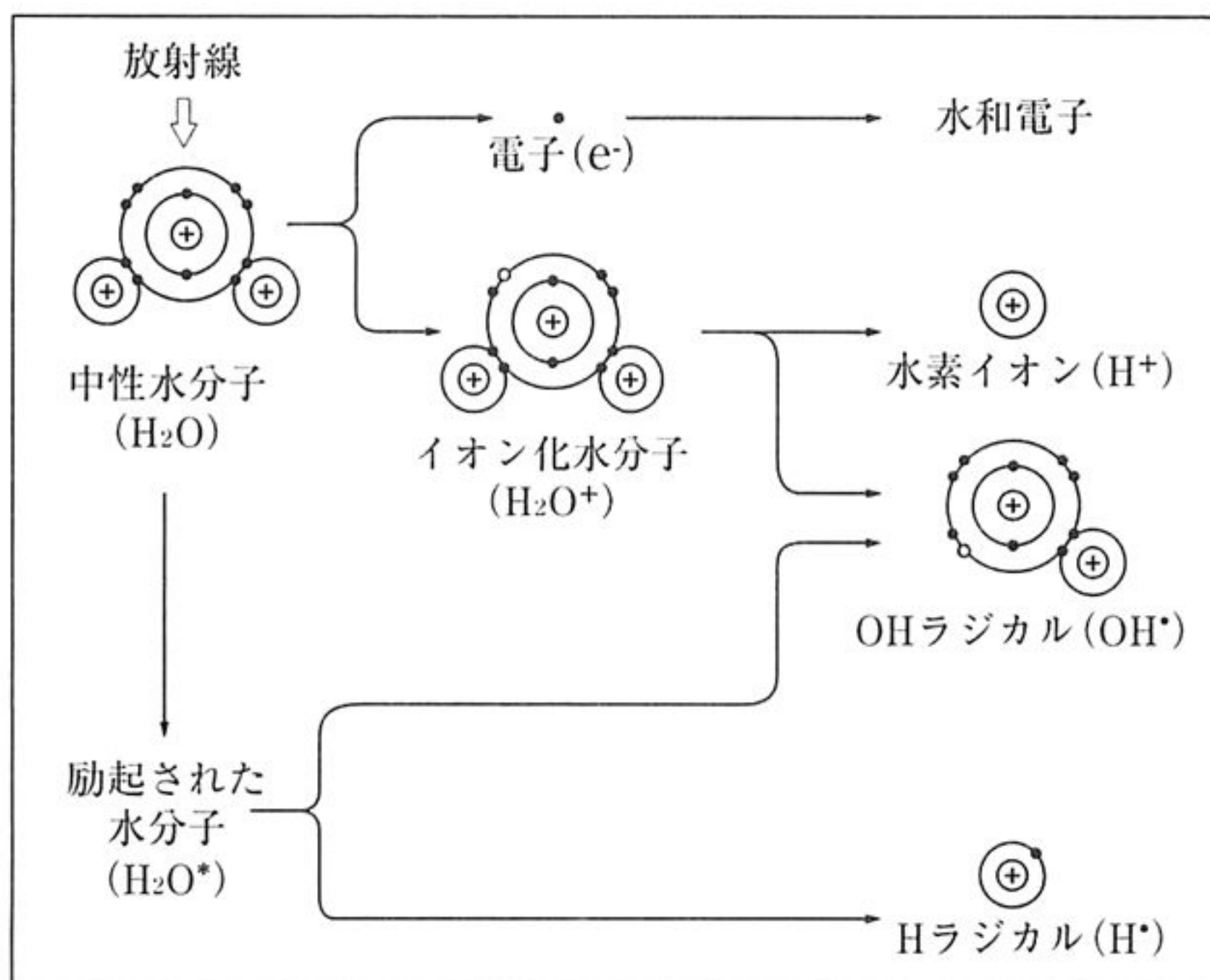



図9－1　水分子からのイオンとラジカルの形成

るまでの過程そのもの、あるいはその表し方に関しては、さまざまな研究者によっていろいろな試みがなされている。順を追って要点だけを見ていこう。

①物理学的段階――放射線のエネルギーが生体分子を構成する何らかの原子に吸収されて、イオンや励起分子が形成される。図9－1に、水分子におけるこれらの過程を示した。このような変化がすべての放射線生物作用の起点となる。

②物理化学的段階――このイオンまたは励起分子からフリーラジカル（単にラジカルともいう）が形成される。フリーラジカルとは二個の原子間の化学結合にあずかっている二個の電子のうち一個を、対をなさない電子（不対電子という）としてもって

いるような物質のことで、きわめて反応性が高い（・は不対電子を示している）。
③放射線化学的段階――この段階ではフリーラジカルが互いに反応したり、他の生体物質に作用してそれらを変化（例えば酸化反応）させたりして、生体にもともとは存在しないさまざまな異常物質を生産する。
④生化学的段階――その結果、生体物質のレベルで細胞本来の構成物質あるいは代謝産物（代謝活動によって生成する物質）の損傷に始まる代謝系の変化、細胞の構成や機能の変化、遺伝物質・膜構成物質・調節機構に関与する物質・高エネルギー物質アデノシン三リン酸（ATP）などの質的・量的変化といったさまざまな異変が起こる。
⑤生物学的段階――細胞のレベルでは細胞構造の変化、分裂機能の変調・低下などが現れ、また個体のレベルでは生体（単細胞生物では細胞）の正常な機能が組織・器官のレベルでの障害によって損なわれる。個体は障害の結果、死に至ることもあれば、それを克服することもある。
各段階の経過時間は、段階を踏むごとに長くなり、遺伝的影響を問題とする世代レベルの場合には原理的には無限大となる。効果は先に行くにつれて増幅される。
各段階をリングに譬えれば、リングとリングがリンク（連結）されてチェイン（鎖）を形成し、先に行くほどリングが拡大される、と表現することができる。
リングの内容は割合よく研究されているが、リンクの実相については、はっきりしていない

部分も多い。

三　放射線の作用形式――直接作用と間接作用

1　直接作用と間接作用の違い

放射線による最終的な生物学的効果（例えば放射線障害）の形成は、つまるところは放射線のエネルギーがどのようなルートで伝達されるか、という問題に帰着させることができる。具体的にいえば、生物にとってかけがえのない物質（DNA）や系（生体膜）に放射線のエネルギーがどのように伝えられるか、という問題といえる。このような物質や系を記号Tで表すことにしよう（図9―2）。

エネルギー伝達の一つの形式は、電離放射線のエネルギーが他の物質分子の介入なしに、直接Tに取り込まれるタイプのもので、その結果、Tは電子を奪われてイオン（T^{+}）、そのラジカル（$T^{\bullet}$）、その変成物（異常生成物）（T'）などに変化する。すなわち、

放射線のエネルギー ⇩ T → $T^{+}, T^{\bullet}, T'$

こうして、Tは本来の生物学的機能を喪失し、その結果、放射線の生物学的効果が現れる。このエネルギー伝達形式を直接作用という。

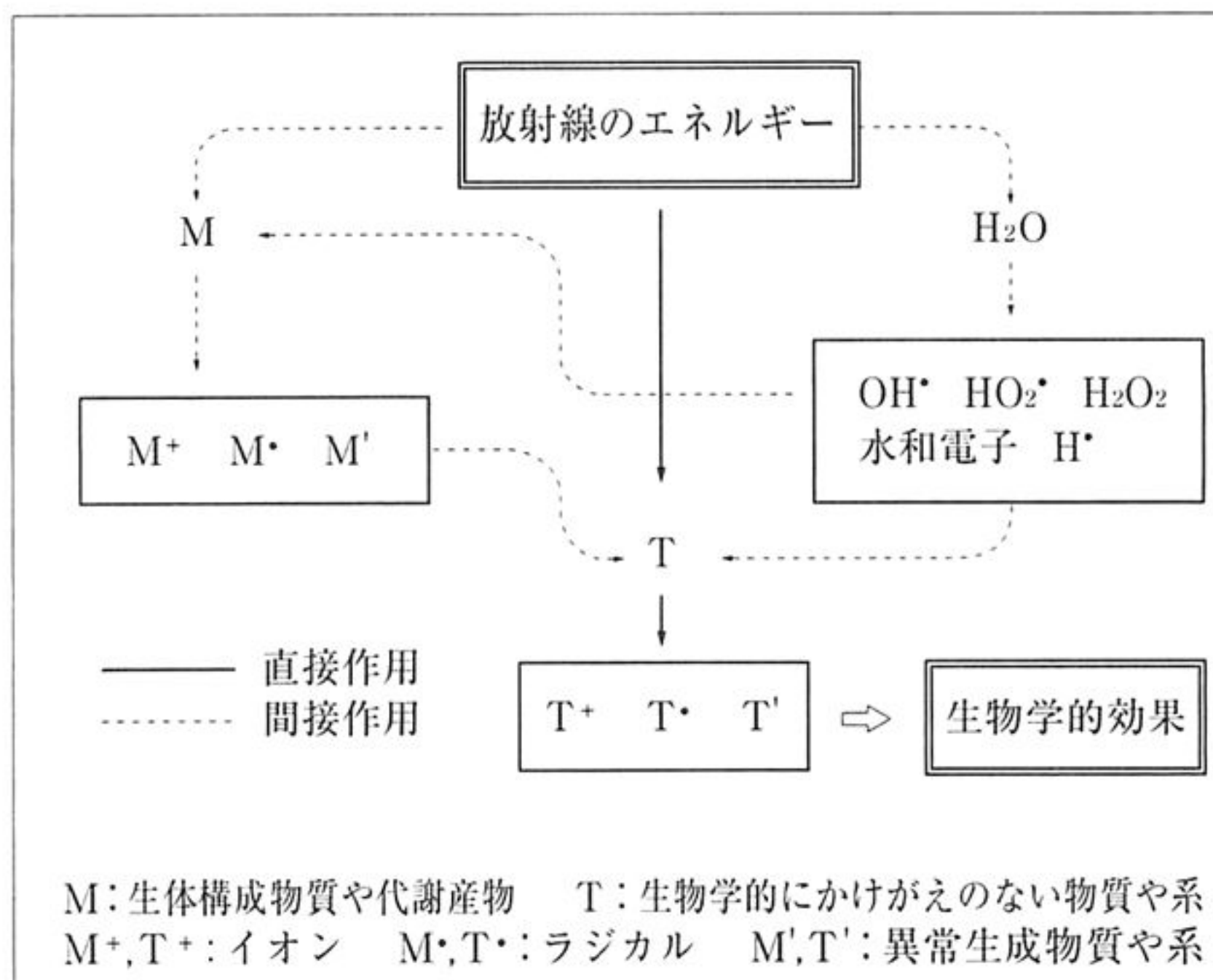



図９－２　放射線の直接作用と間接作用

直接作用を重視する立場は、次に述べる標的理論と結びついている。

もう一つの形式は、Ｔへのエネルギー伝達が間接的になされるもので、間接作用と呼ばれている。この場合に介在するのは主に水の分子で、放射線のエネルギーが水分子に吸収されると、イオン化された水分子や励起された水分子が形成され、これらの物質から、分子状酸素も関与して、エネルギーレベルの高い各種の物質（枠内に示したラジカル〔OH•やHO₂•〕、過酸化水素、水和電子〔周囲を水分子によって囲まれた電子〕など）が生成する（図９－１）。放射線のエネルギーは、これらの物質を経由してＴに伝えられる。これらの物質が有するエネルギーのＴへの伝達が、水以外の物質分子

（例えば記号Mで示した生体構成物質や代謝産物）を経由してなされることもある。また、水→M→Tというエネルギー伝達経路も存在する。

放射線のエネルギー ⇩ 水（またはM） ⇩ T → T^+, $T^\bullet$, T'

または　放射線のエネルギー ⇩ 水 ⇩ M ⇩ T → T^+, $T^\bullet$, T'

2　標的理論

線量-効果の関係を示すグラフの形

古くからの研究によって、核酸や酵素などの分子、あるいは細菌や細胞集団などの簡単な系について、横軸に線量、縦軸に効果（分子なら破壊、細胞なら死など）をとって、線量と効果の関係をグラフで表すと、線量がある値以上になると効果が現れてくるしきい値（あるいは閾値(いき)）は見られず、それが指数曲線型やS字曲線型のグラフで表される例の多いことがわかっていた。これは、細菌において薬剤に対する耐性の関係を調べると、薬剤の濃度にしきい値が見られるのとは対照的である。

これらの曲線を数理的に解析することによって導入されたのが、ヒット説あるいは標的理論（ターゲット理論）と呼ばれる量子論的な考えである。

指数関数型の曲線が描かれるわけを一つの譬えを引いて考えてみよう。今、多数のトリの群

れに弾を放ってトリを射落とすという場面を想定する。まず、一発の命中でトリが死ぬ場合がある。最初のうちは命中率は高いが、生き残りが少なくなるにつれてだんだんとあたる確率が低下していくだろう。すなわち、命中率がトリの残存数に反比例することがわかる。

縦軸にトリの生き残り数を、横軸に放った弾の数をとって示すと、この関係は指数曲線を描いて減少するグラフとなることが予想できる。

ところが、トリの仲間には頑丈で一発の命中では死なず、それを死なせるためには二発あるいはそれ以上の命中を必要とするものもあるだろう。この場合は、上の関係は、別の形のグラフで描かれるだろうことが期待される。

標的理論では、右の譬えにおけるトリの急所を標的（ターゲット）、トリに弾が命中する事象をヒットと呼んでいる。また、急所、すなわち標的の数は一個とは限らず、複数個存在する場合もあること、そして標的に弾が一発あたれば死ぬ場合もあれば、二発、三発とあたらないと死なない場合もある、と考える。

このような考えをもとに数学的解析を進めると、線量と効果の関係について得られている、例えばＳ字曲線型のグラフを含むいろいろな形状のグラフが説明できるのである。

標的理論の適用範囲と変貌

一九六〇年代に至って標的の実体はDNAであることが認識され、「放射線はDNAや染色体を損傷することによって障害を結果する」という図式が描かれ、この方向の研究が大きな流れを形成するに至った。しかし、この先述べる（一八一ページ）ように、標的理論では説明の困難なさまざまな事実や現象があること、既述（一七六ページ）のように、標的になると考えられる重要分子へのエネルギー伝達が直接的にだけでなく、他の分子を介して間接的になされることもあること、第十章で取り上げるように、DNAのほかに生体膜が放射線で損傷を受けても細胞や個体の障害・死の原因となることがあること、などの知見から、この理論は批判を受けるに至った。

標的理論は観察される線量-効果の関係を数学的手法で見事に説明することによって、放射線生物学の発展に間違いなく一時期を画した。それは、生物学的活性をもつ各種の対象（酵素・ウイルス等）について、理論的に求められるそれらの分子量（標的分子量）と、通常の物理化学的手法で得られた分子量との間に対応関係が成立することを明らかにするに及んで、揺るぎない理論として迎えられた。コウボの倍数体間の放射線感受性が異なる理由は、一倍体、二倍体、そして四倍体がそれぞれ標的を一個、二個そして四個もつためであるとして説明できた（一六七ページ参照）。

しかし他方において、標的理論では説明の困難な事実も指摘された。この理論では時間の要因を考慮しないが、放射線の生物学的効果が一定線量を照射する時間の長さに左右されるような例はいくらでもある。線量-効果関係に見られる曲線の形状が、酸素濃度・温度・培養培地の組成などで変化することも説明がむずかしい。さらに、この理論では、放射線効果が増幅される現象や、障害が回復（あるいは損傷が修復）される現象の説明もできない。そして、何よりもの難点は、高等な多細胞生物を個体レベルで扱うときに単純には適用できないことである。

こういう背景があって、また放射線による生物の死においてDNAの二本鎖切断が果たす致死的な作用を考慮に入れて、幾人かの研究者たちは、七〇年前後に標的理論とは違うモデルを提唱した。また、ほぼ同じころにオルパーという研究者は、細胞死が起こるためには、放射線で損傷を受けたいくつかの部位（エネルギーが沈積される場）が相互に作用しあう必要があること、すなわち、標的には酸素の有無に左右されにくいDNAと、酸素の存在に左右されやすい生体膜の二つがあることを実験的に示し、細胞死に対する生体膜損傷の関与を強調した。

他方、旧ソ連のクージンおよびその学派は、標的理論が放射線作用の時間的要因を考慮していないこと、また間接作用を軽視していること、などの観点からそれを激しく批判し、それに代わるところの、間接作用を重視した構造-代謝説という考えを提唱している。

3　間接作用

放射線は生体系に対し直接作用のほかに間接的な作用も及ぼす。

その証拠として希釈効果、保護効果、凍結（温度）効果、および酸素効果などと呼ばれている効果（現象）があげられている。ただし、希釈効果以外の三つの効果は、直接作用の考えでも説明できることがあるとされており、もっとも有力な証拠は、希釈効果という現象である、と考えられている。

〈希釈効果〉

デールという学者は、水溶液中におけるある種の酵素の放射線による失活率（働きを失った分子の数／最初に存在していた分子の数）が希釈溶液中ほど高くなる、という事実を実験的に明らかにし、それは酵素分子が放射線のエネルギーを直接受け取って働きを失うだけでなく、水の放射線分解で生じたフリーラジカルによる追い打ちの損傷を希薄溶液ほど受けやすくなるためである、として間接作用の存在を説明した。

〈保護効果〉

これは、ある系が添加物の存在下で放射線障害から保護されるという現象で、添加物が系の物質とラジカルを奪い合うためであると説明されている。例えば、酵素はグルコースなどの添加によって失活率が低下するし、コウボなどの生物の生存率は培地中にフルクトースを加える

と増加する。植物の放射線抵抗性が動物などより高い理由として、植物種ごとに多量に生産される特異な代謝産物、例えばアブラナ科の場合は、この科の植物に多量に含まれるシナーピン（フェノール性化合物の一種）が保護効果に関係している可能性も考えられる（一六七ページ）。

しかし、添加物が放射線のエネルギーを、水由来のラジカルを介することなく直接捕捉するとして、保護効果を説明することもできる。

〈凍結効果〉

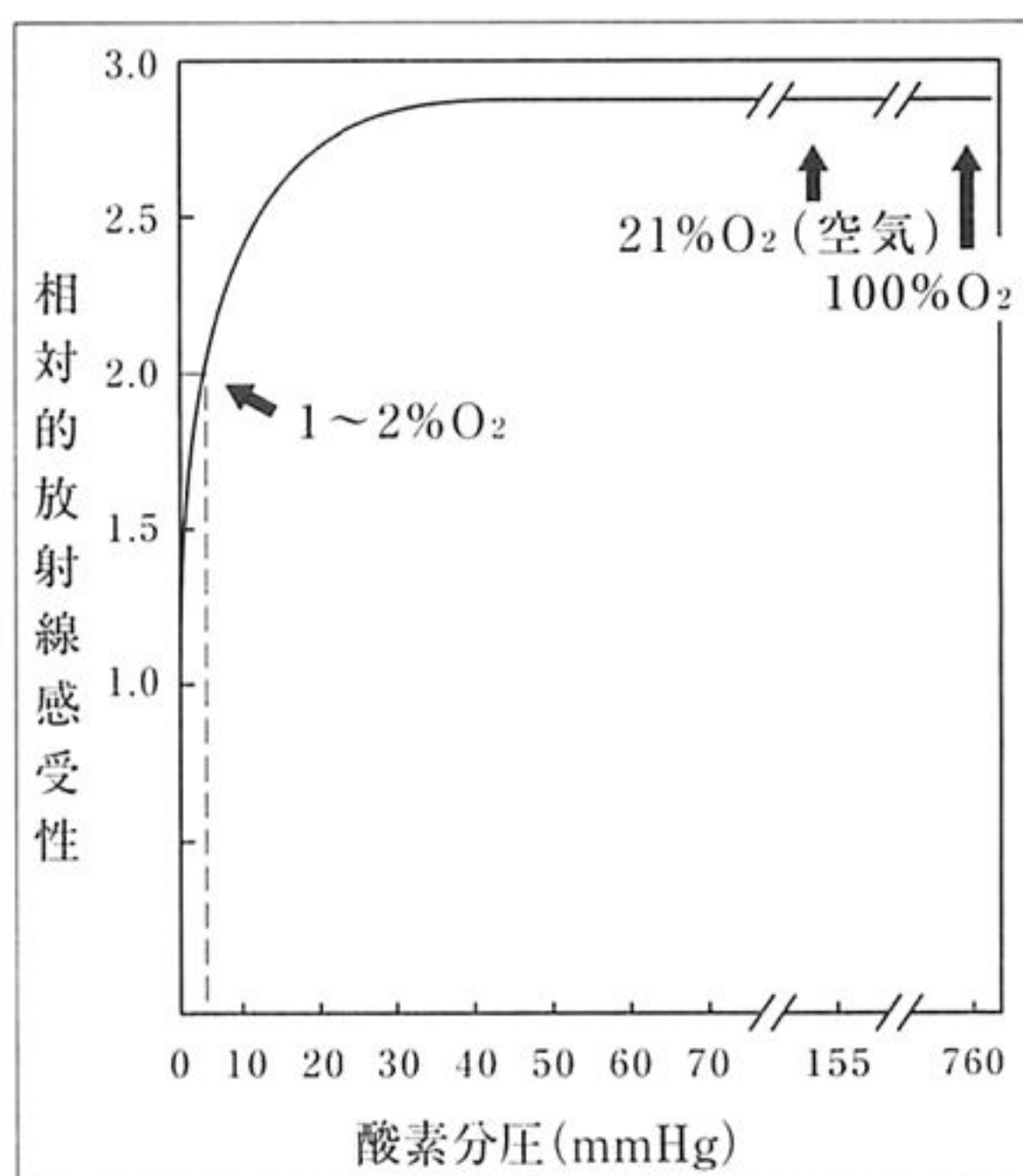
温度効果と呼ばれることもある。凍結したサンプルに放射線を浴びせると、凍結しなかったサンプルよりも放射線の影響が低くなるという現象である。これは、凍結によって水由来のラジカルの移動が抑制されるためである、と説明されている。

〈酸素効果〉

これは、間接作用の存在を示す証拠としてとりあげられる以外、放射線生物学上も、あるいは医療の実際でもきわめて重要な現象なので、次に項を改めて述べよう。

4　酸素効果

酸素効果とは

酸素効果というのは、生物対象中の、あるいはその環境中の酸素の濃度をゼロにしたり、そ

の分圧を下げると、対象の放射線感受性が低下する（放射線抵抗性が増大する）という現象で、広い範囲の生物対象で普遍的に観察されている。放射線の間接作用の存在を示す証拠の一つとされることもある。この酸素効果を示すものとして、古くから次のような事実が知られていた。

患部の治療にまだ規制を受けずにX線が使用されていた二〇世紀の初め、シュヴァルツという学者は、X線管を患者の皮膚に強く押し当てて血行を抑制すると、皮膚の障害が軽減される、という事実を観察した。

図９－３　酸素効果

これと同様の効果は、大腸菌を無酸素条件下で、すなわち窒素で置換した気体中で放射線にさらすと、その生存率が通常の空気中で処理した細菌よりも高められるという事実、ネズミの吸気中の酸素濃度を通常空気の二一％から八・二％まで落とすと、致死線量の放射線を照射してもネズミが生存できるという実験結果、ネズミの骨を一本だけヒモで縛って骨髄への血行を抑

制すると、致死線量照射でも一部のネズミは生き残るという観察などによっても示された。
これと逆の事態、すなわち酸素濃度を高めると、放射線障害を受けやすくなる、という事実も明らかにされた。例えば、ある種の回虫の卵の放射線感受性は、酸素の存在下では無酸素下の三倍に増加した。

酸素効果の基本的性格

図9－3は、縦軸に相対的放射線感受性を、横軸に酸素分圧（あるいは濃度）をとって、両者の関係を概念的に示したものである。この図から次のようなことがわかる。
①酸素濃度を高めると、放射線感受性は増大する。
②しかし、酸素濃度の増加に伴う放射線感受性の増加には上限があり、酸素分圧が通常の空気よりも低い水銀柱ほぼ三〇ミリで飽和に達する。
③完全に無酸素としても放射線感受性をゼロにすることはできない。
さらにその他の実験から、放射線感受性を増加させるには、照射中に酸素が存在していなければならないことが示された。例えば、ある種のバクテリアを用いた実験では、無酸素の条件下で放射線を〇・〇二秒間照射し、その〇・〇七秒後に酸素を供給しても生存率を低下させることができなかった。

興味深いのは、線エネルギー付与（LET、六〇ページ）の高いα線や中性子線などの放射線では、酸素効果はほとんど現れないか、全く現れないことである。目の水晶体は血管を欠き、したがって酸素濃度が低くなっているにもかかわらず、これらの放射線照射（被曝）による障害の発生は軽減されない、とされている。これは中性子線が目の白内障を引き起こしやすいとされている理由だが、この考えには異論もある。

酸素効果の医療への応用

酸素効果は実際の医療、すなわち放射線によるガン組織の縮退に利用されている。

ガンの放射線治療にあたっては、ガンの近くに存在する正常組織の放射線障害をできるだけ低く抑えることが要求される。ガン組織は血管を欠くため低酸素状態になっており、一方、健康組織は血管に富み通常の酸素濃度になっていて、その放射線感受性がほぼ最大値に達している。したがって、ガン組織と健康組織の両方を含む部分の酸素分圧を高めれば、健康組織の放射線感受性は酸素濃度を高めても現在以上には上昇せず、一方、ガン組織の放射線感受性は増加することになり、右の目的を達成することが可能になる。逆に、健康組織を低酸素にして放射線の影響から保護することも、酸素効果を利用する別の方法である。

第十章　障害の克服

初めに用語の問題についておことわりしておきたい。放射線作用の致傷面を表す用語として「障害」と「損傷」が使用されている。厳密な定義はまだないが、個体や組織・細胞のレベルでは障害（injury, hazard）を、細胞小器官（ミトコンドリアなどの細胞以下の構造体）や分子のレベルでは損傷（lesion, damage, impairment）を用いる傾向が見られる。一方、負の放射線効果が正常状態に復元される現象に関しては、障害に対しては回復（recovery）が、損傷に対しては修復（repair）が使われているようである。著書によっては明白な定義づけのなされているものもあるが、本書でもこのような使い分けをしている。

一　生物個体および細胞における障害の克服

これまで半致死線量という言葉がしばしば使われてきたが、それはある条件で照射された、あるいは被曝した複数の個体の半数をある時間内に死に至らせる線量のことである。すなわち、半数の個体は障害を克服して生き残り、障害からの回復を果たすことを意味する。

確定的影響（非確率的影響）とされる多くの身体的障害に対し、生体は回復の過程を作動させる。

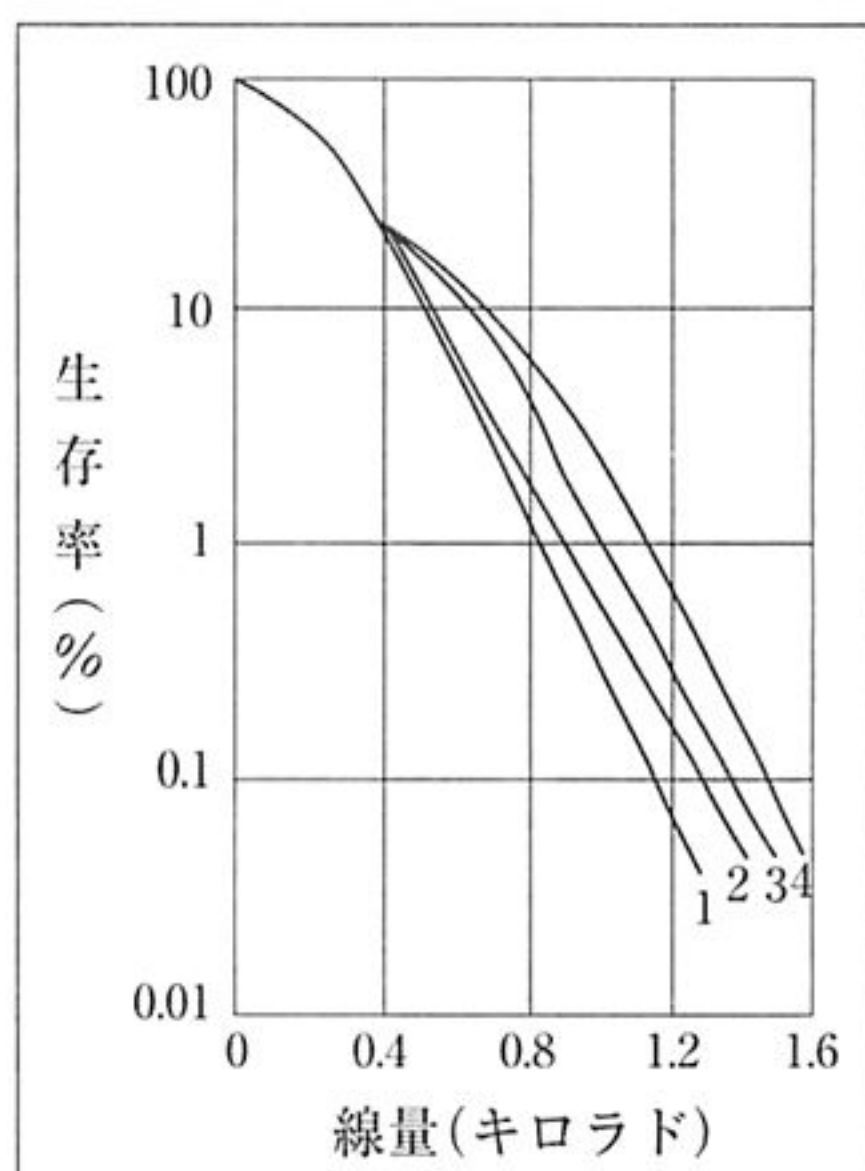



図10－1は、細胞レベルにおける回復現象を示す例である。縦軸は生存率を、横軸はある線量を二回に分けて照射した場合（これを分割照射という）の各線量の和である。この実験では、哺乳類の培養細胞に四三三ラドの放射線をまず照射して間をおくことなく次の照射を行う（1）一方、二・六時間後（2）、五・三時間後（3）、一〇・六時間後（4）に残りの線量の放射線を照射した。培養細胞の生存率は、一回目と二回目の線量の和が同じであるにもかかわらず、二回目の照射までの時間間隔を長くとるほど高くなることがわかる。つまり、時間間隔に依存して回復が大きくなる、と考えることができる。

図 10－1　哺乳類培養細胞の回復

このような回復現象は、マウスを用いた個体レベルでの実験でも示されている。この動物に全身一回照射して、その半致死線量が五一八レントゲンであることを決定してから、次のような実験を行った。すなわち、マウスに半致死線量のほぼ半分に相当する二五八レントゲンを浴びせた後、二、一〇、二〇日後に二回目の照射を行い、それぞれの場合について半致死をもた

らすのに必要な追加の線量を求めた。もし最初の照射から二回目の照射までの間に回復がなければ、すべての場合について二回目に必要とされる線量は、（518－258＝）二六〇レントゲンでよいはずである。しかし、二回目に必要とされた線量は、二日後の照射では三〇五レントゲンだった。つまり（305－260＝）四五レントゲンに相当する障害がこの期間に克服された（回復した）、と見なすことができる。同様に一〇日後の照射では追加線量は四三七レントゲンで、〝克服〟線量は一七七レントゲン、二〇日後の照射では追加線量は四七八レントゲンで〝克服〟線量は二一八レントゲンとなって、一回目と二回目の照射の間隔を長くとるほど、〝克服〟線量が高いこと、すなわち回復の大きいことがわかった。またこの実験から二五八レントゲンの効果を半分克服するのに要する日数を求める試みもなされ、マウスについては三〜八日とされた。同様な実験から、イヌでは一四〜一八日、ロバでは二〇〜二八日という値が得られた。

　回復における諸器官の相対的重要度を評定するために、マウスのさまざまな器官を放射線があたらないように遮蔽してから、全身に致死線量を超える放射線を照射した後の生存率を求めた。その結果は、腎臓〇%、後肢〇%、腸二七%、頭部二八%、肝臓三八%、脾臓七八%となり、脾臓が回復で果たす役割の大きいことがわかった。事実、脾臓を遮蔽すると、血管中の血液細胞数の回復が速められることが認められている。

二　細胞障害とその克服

個体レベルの障害については、これまでたくさんの例を見てきた。そこでレベルを細胞におろし、その障害を見ていこう。

1　細胞サイクル

多細胞動物の体では、細胞がたえず更新されている。疲弊した細胞が廃棄され、新しい活性の高い細胞でおきかわる。こうして、体を構成している細胞の数は現状に維持されるか、あるいは増加することになる。これが可能になるのは、細胞が分裂して新しい細胞を作り出していくからである。

細胞分裂によって形成される二個の細胞（娘細胞）のうちの一つは、分化の過程に取り込まれ、ある働きをするのに好都合な機能細胞に変化するが、もう一つの細胞は分化せず、再び分裂して機能細胞を作り出していく。すなわち後者の細胞では、分裂から分裂まで一つのサイクルをなしている。これを細胞サイクル（細胞周期）と呼ぶ。細胞サイクルは、染色体が出現して細胞の分裂が行われる分裂期（M期）と、染色体が消滅し次の分裂に備える間期とに分けられる。

間期は三つの段階からなる。最初のG1期はDNA合成の準備期である。次のS期ではDNAが複製され、最後のG2期は細胞分裂準備期で、タンパク質が合成される。哺乳類での経過時間は、G1期は動物ごとに多様だが、S期は六〜一〇時間、そしてG2期が二〜三時間である。M期は、前期・中期・後期・終期からなる。前期で核内の染色糸が染色体に変わり、さらに縦裂して二本の染色分体となる一方、核膜と仁が消失する。中期に入ると、染色体が細胞中央部に並ぶ。後期には染色分体が分離して二個の娘細胞に移動する。終期に娘細胞の染色体の形が不明瞭になり、核膜と仁が出現して、二個の娘細胞が完成する。

放射線に対する細胞の感受性が特に高いのは、DNAの合成がなされるS期や、染色体が二個の細胞に分かれるM期である。

2　細胞障害の諸相

細胞障害は、染色体の分裂が不完全な有糸分裂不全（異常）による分裂障害と、細胞死とに分けられる。細胞死は、何らかの形でDNAの損傷がからんでいる分裂死（増殖死）と、DNA以外の物質の損傷によっても起こる間期死とに分けられる。言葉の厳密な意味では、細胞分裂能を失った細胞には間期が存在しないので、間期死という用語は通用しないが、分裂死以外の細胞死を間期死と呼びならわしている。

細胞障害の様相は、線量や線量率、細胞の種類などに左右される。また、生体の中に存在している状態の細胞と、生体から単離され培養された状態の細胞とでは、かならずしも同じではない。

線量との関係

厳密な数値で表すことはできないが、線量をごく大ざっぱに小線量・中線量・大線量・超大線量に分け、それぞれの線量で見られる典型的な細胞障害について要約しよう。

①小線量ではある潜伏期間をおいて染色体異常や突然変異の現れる可能性があるが、形態的に認識できる細胞障害は見られない。

②中線量における細胞障害は多様で、分裂遅延・分裂阻害・分裂死などがある。これらの細胞障害のうち、分裂遅延と分裂阻害を分裂障害と呼ぶ。

(1)分裂遅延というのは、次に起こるべき有糸分裂が照射によって一時的に遅延する現象で、分裂後は正常にもどる。この遅延期間中に細胞障害の回復過程が進行する。

(2)分裂阻害は、さらに高線量の照射によって起こる。細胞はある時間生きることができるが、分裂能力は永久に失う。この細胞は分裂してコロニーを形成することができないので、実験において計数されない。そのため代謝能力を備えていても死んでいると見なされる。

(3)分裂死あるいは増殖死は、放射線を浴びた細胞そのものの死ではない。親の細胞のDNAや染色体に生じた何らかの損傷のために、分裂してできる細胞が死ぬ現象である。数回分裂してできる細胞がしばしば巨大細胞となって死ぬ場合もある。

③大線量のもとでは間期死が起こる。これは放射線を照射された細胞そのものの死である。分裂能をもつ細胞が分裂することなくそのまま死ぬのも、間期死である。代謝異常、生体膜の損傷などによる細胞内ホメオスタシス（恒常性）の乱れ、毒性物質の生成、クロマチン（染色質、一九七ページ）の崩壊などがその原因となる。

④超大線量照射で引き起こされるのは分子死である。分子の変性がその原因である。放射線生物学でとりあげる現象ではない。

細胞障害・回復の基本的過程

放射線を浴びて傷を受けた細胞では、この傷を除こうとする回復の過程が進行する。要点は、核損傷・生体膜損傷・代謝異常などによる細胞障害が細胞死を導くか、それとも正常代謝過程からの働きかけが傷ついた細胞を回復の方向に向かわせるか、ということになる。

個体レベルの回復の土台には、細胞以下のレベルや分子のレベルでの修復がある。本書では細胞以下のレベルでは生体膜の損傷と修復を、分子レベルではDNAの損傷と修復をとりあげ

よう。

3　生体膜の損傷と修復

生体膜の機能

生体膜とは何か。細胞は仕切りによって外界と隔てられている。この仕切りを細胞膜と呼んでいる。さらに細胞の内部にもさまざまな仕切りがあり、それによって細胞のさまざまな部分が多様な区画を作っている。これらの仕切りは細胞内膜と呼ばれる。

細胞膜と種々の細胞内膜を一括して生体膜と呼ぶ。もしこの生体膜がなかったら、細胞の独立性は維持できないし、また細胞の中は単なる均一な溶液に変じてしまい、生命は存立しえないだろう。

生体膜の機能には、次のようなものがある。

①仕切り機能――膜の内部の外部からの隔離、物質の逸出防止。

②輸送――物質を細胞の外部から内部へ、あるいは逆向きに、さらに細胞内のある区画の間で、ある場合には選択的に、一方向的に、また速やかに移動させる機能。

③エネルギー貯蔵物質であるアデノシン三リン酸（ＡＴＰ）の生産。

④ラジカルを取り除く機構の装備。

⑤情報感受——物理的ないし化学的な刺激の受容（例えば化学的受容体としてのホルモン受容体や、物理的刺激〔光〕の受容体としての目の網膜細胞の膜に存在するロドプシンがある）。
⑥核膜の場合は、ＤＮＡと結合して細胞分裂の進行を調節。

膜構造に対する放射線の作用

膜を構成する主成分は、タンパク質と脂質（リン脂質）である。
タンパク質分子に誘起される変化は、二個の構成アミノ酸の間に橋が形成される反応（架橋形成）、ある種の構成アミノ酸の損傷、立体構造の変化などだ。
一方、脂質に起こる変化は、不飽和脂肪酸の過酸化、脂質の加水分解、脂質間の架橋形成、流動性の変化などで、この他に脂質-タンパク質間の架橋形成もある。
これらの損傷が発生する度合いは、照射条件と膜組成に左右されることになろう。

脂質の過酸化

生体膜に対する放射線の作用でもっとも注目されるのは、脂質を構成する脂肪酸に与える影響だ。分子内に二重結合をもつオレイン酸・リノール酸・リノレン酸などの、いわゆる不飽和脂肪酸が放射線の作用で生成する活性酸素などによって酸化され、過酸化物が生成する。この

反応は、循環的に進行する連鎖反応である。すなわち、酸素が存在すれば、不飽和脂肪酸の過酸化物が限りなく作られていく。これは一七三ページで言及した放射線の増幅作用の一形態である。

過剰の過酸化物は、生体膜の構造上・機能上の体制に損傷をもたらす。例えば粘性・表面電荷・化学組成などを変化させたり、DNAと核膜の間の結合を破壊したりする。その結果、膜の機能に次のようなさまざまな異変が生ずる。

・透過性が増大する。例えば赤血球からカリウムイオンやナトリウムイオンが流出する。
・エネルギー生成系が損傷を受け、アデノシン三リン酸（ATP）合成が阻害される。
・解毒機構（ラジカル除去機構）が損傷を受ける。
・調節系が損傷を受ける。
・タンパク質-脂質の結合が変化して、膜結合酵素の活性が変化する。
・細胞分裂の過程が変調をきたす。

膜損傷からの防護

生体は、このような生体膜損傷に対抗するさまざまな防護機構を備えている。放射線は種々の活性物質を生産するが、細胞にはこれらの物質を取り除いて膜を保護する酵素や物質が存在

している。

①カタラーゼやペルオキシダーゼという酵素によって、水から放射線の作用で形成される過酸化水素（H_2O_2）を分解し、あるいは消費して取り除く。

②ラジカルを除く機構を備えている。例えばスーパーオキシドジスムターゼという酵素（しばしばSODの名で目に触れる）は、スーパーオキシドラジカルアニオン（$O_2^{-\bullet}$）を除去する。これもよく耳にするポリフェノール類（植物は、それぞれの種に特有の多様なポリフェノールを、しばしば多量に生産する）にもラジカル除去作用のあることが知られている。

③グルタチオン、アミン類、トコフェロール、ビタミンE、ビタミンC、ユビキノンなどの物質が過酸化物を除く。これらの物質のあるものは、抗酸化剤として働く。

4　DNA分子の損傷と修復

構造

DNA分子は、細胞内に長く引き伸ばされた形で存在しているのではない。二本のDNA分子がヒストンという塩基性のタンパク質に巻きついてヌクレオソームとなり、さらにこのヌクレオソームどうしがリンカーDNAによって互いに連結され、別のタンパク質やRNAも加わり、ふたたび巻きが入ってクロマチン（染色質）を作り上げる。このクロマチンが高度に凝縮

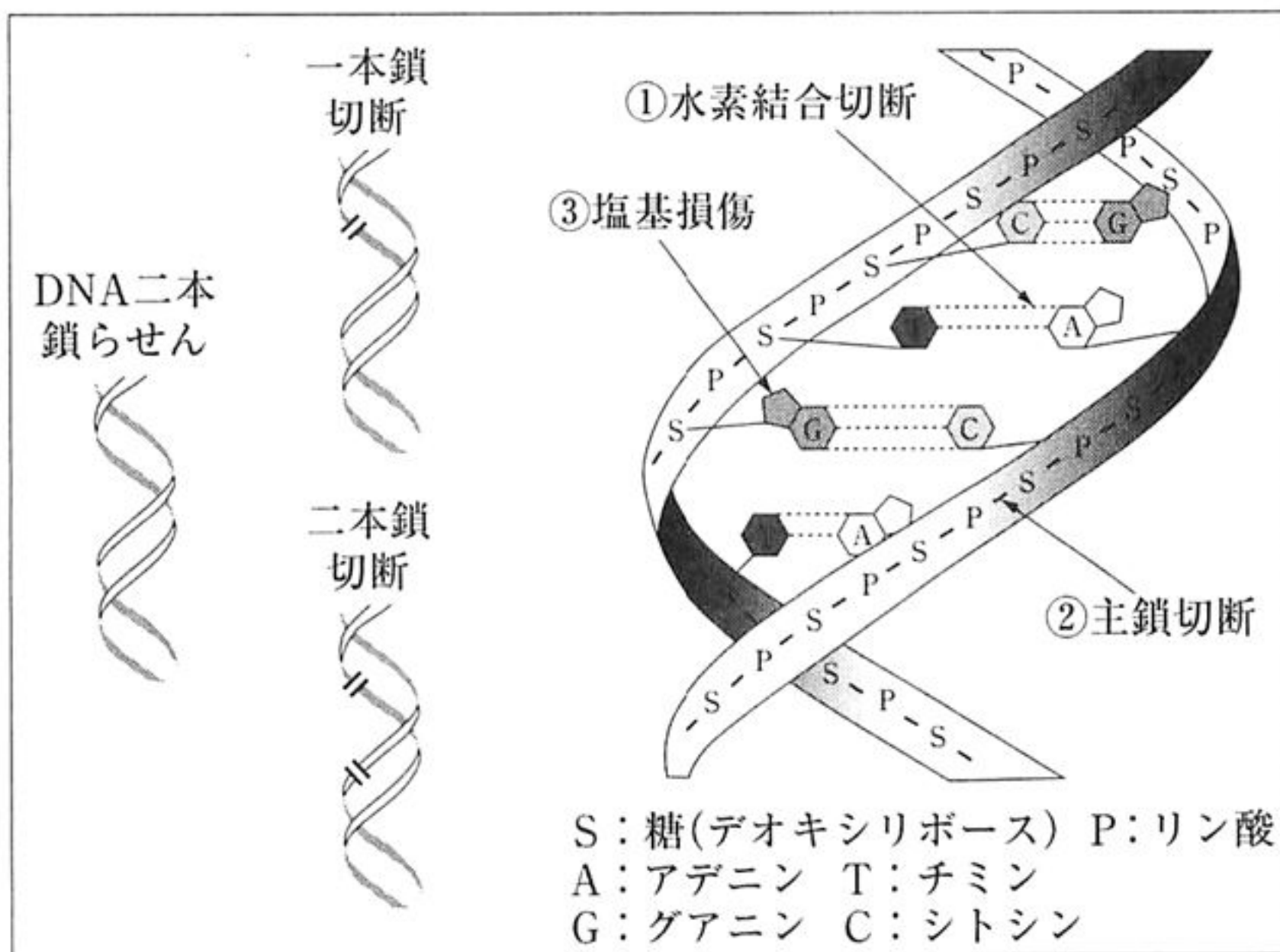



図 10－2　DNAに対する放射線の作用

して、細胞が分裂するときに現れる染色体となるのである。

DNA分子は、－糖－リン酸－糖－リン酸－糖－という鎖（これを主鎖、あるいは非塩基サイトという）のそれぞれの糖の部分に塩基が付いてできる重合体（ポリヌクレオチド）で、二本のDNA分子が塩基の部分で水素結合によって連結され、こうしてできる二本鎖が螺旋状に巻いた形をとって存在している。いわゆるDNAの二重らせん構造と呼ばれているものである。

損傷

このようなDNA分子に対して電離放射線がもたらす損傷は、大まかに次のようになる（図10－2）。

①水素結合の切断による二本の鎖の分離。

②主鎖の切断（放射線の量や質によって一本だけの場合の一本鎖切断と、二本に及ぶ場合の二本鎖切断とがある。二本鎖切断は生成も修復もされにくく、細胞死の主因となる）。

③塩基部分の損傷。

なお紫外線は、塩基の部分は傷つけるが、主鎖を切断するほどのエネルギーはもっていない。

損傷DNA分子の修復

細胞はこれらの損傷DNAを修復するさまざまな機構を備えている。

マックグラスらは一九六六年、大腸菌の放射線抵抗性の株を用い、一本鎖切断DNAの再結合修復を示す次のような実験結果を報告した。この株にX線を二〇キロレントゲン照射してから、放射能標識したチミジンを含む培地の中で、〇、二〇、四〇分培養する。培養後アルカリ処理して二本のDNAを離して一本鎖とし、上から下に向かって濃くしたショトウ溶液の円柱の上に試料をのせ、遠心分離にかけると、重い分子ほど円柱の下方に沈降する。そののち円柱の各部分（画分、フラクションという）を分取し、それらの放射能を調べると、放射能のピークが培養時間の経過とともにより重い画分に移行し、四〇分で非照射対照のそれと同じ位置に来ることがわかった。これは、放射線によって切断された主鎖の断片が接ぎ合わされ、本来の分子量をもつDNAが復元されたためと解釈される。一方、放射線に高感受性の株では、このよ

うな復元は見られなかった。
高等植物でもエンドウの根を用いて行われた実験で同様の結果が得られている。

修復機構

このような元のDNAへの復帰は、どのようにして起こったとされているか。

放射線による一本鎖DNA損傷には、その塩基部分に起こるもの（塩基損傷）と、主鎖の部分に起こるもの（主鎖切断）とが含まれる。塩基損傷の場合は、DNAの分子量は変化しないが、主鎖が切れた場合には、右の実験で見られたように、分子量の減少が起こる。

①塩基に損傷が生じた場合は、特殊な酵素が損傷塩基を除去する。ついで、別の酵素によって、⑴主鎖が損傷塩基の近傍で切断されて起こる除去修復か、⑵主鎖の切断を伴わない、塩基だけの取り替えが行われる。

②主鎖の切断を伴う場合は、リガーゼという連結酵素がDNA主鎖の切れた末端どうしをつなぎ合わせる即発型の再結合修復の他に、以下に述べる除去修復や組み換え修復などが起こる。

〈除去修復〉

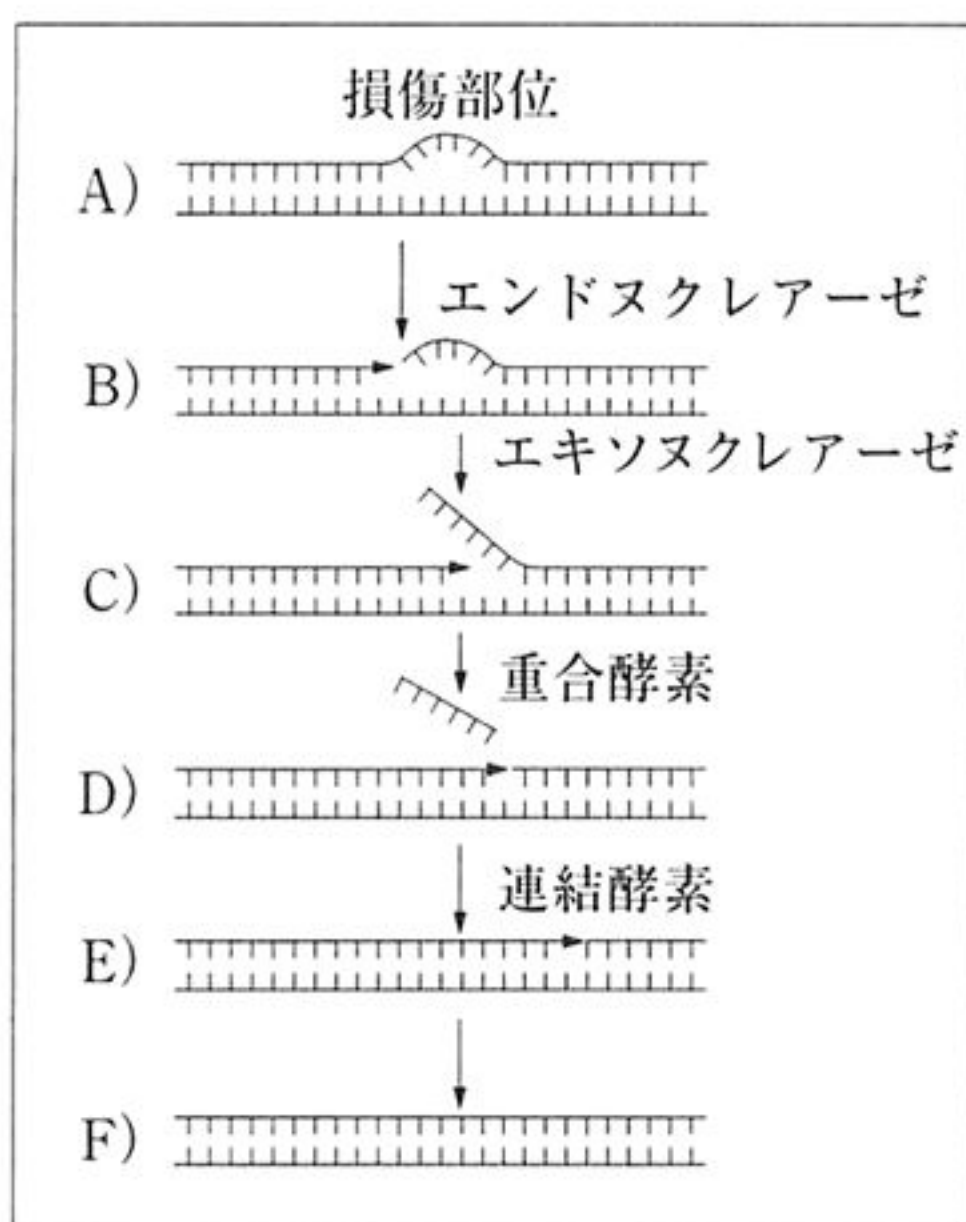
除去修復は、DNA分子の複製前に起こる修復である（図10－3）。損傷塩基がDNAグリコシラーゼという酵素によって除去されたのち（A）、DNA分子の内部の結合を特異的に切

断する酵素であるエンドヌクレアーゼが損傷部位を認識しDNA鎖を切断する（B）。ついで、DNA分子を末端から切断する酵素であるエキソヌクレアーゼがある長さのDNA断片を除去する（C）。こうして除去されたDNAの部分を、DNAポリメラーゼ（DNA重合酵素）がd-XTP（デオキシリボヌクレオチド三リン酸。四種類あり、Xはそのうちのいずれかであることを示す）を基質とし、もう一本のDNAを鋳型にして埋めていく（D）。最後にDNA連結酵素が二つの末端部分をつなぎ合わせ（E）、損傷前のDNA鎖を復元する（F）。

図 10－3　損傷DNAの除去修復

〈組み換え修復（複製後修復）〉

組み換え修復というのは、損傷DNAの修復が右記の除去修復では完全に行われなかったとき、複製を行ってから娘DNA鎖との間でその損傷部分を修復する追い打ちの修復で、それゆえ複製後修復とも呼ばれる。このようにして生物は、自分の子孫を完全に残すための〝二の矢を放つ〟（図10－4）のである。

図の太線は親DNAを、細線は複製でできた娘DNAを示す。また、CTは塩基シトシン-チ

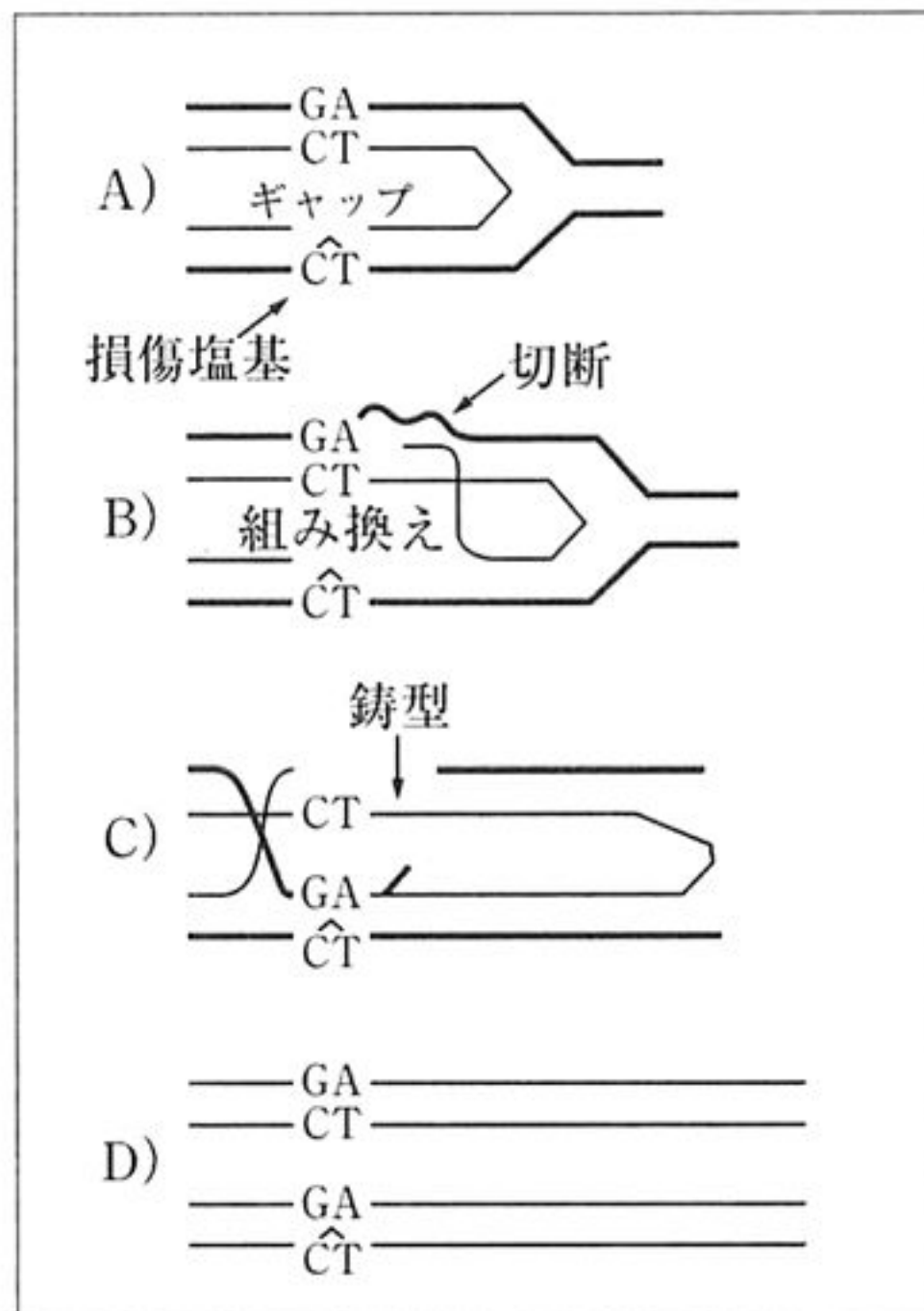



図 10－4　損傷DNAの組み換え修復

ミンを、GAはそれらと相補的な塩基グアニン-アデニンを、それぞれ表しており、〈CTの記号は塩基が損傷を受けていることを意味する。

（A）娘DNAが複製された段階で、最下段の親DNAに損傷部位（〈CT）が生じている。娘DNAにはこれと相補的なヌクレオチド部分（GA）が複製されないため、ギャップと呼ばれる欠損部分が生じている。

（B）最上段の親DNA鎖に切れ込みが生じる。この親DNAと、ギャップをもつ娘DNAとの間で組み換えが起こる。

（C）このギャップ部分は相補的な親（鋳型）DNAの無傷の部分（GA）を切り出して埋められる。

（D）一方、上段の親DNAにおける切り出されて空白となった部分は、すでに形成されている娘DNA部分（CT）を鋳型として補填される。

これらの修復機能が存在するという事実から引き出せる重要な知見は、たとえDNAが放射

線によって損傷を受けても、細胞が放射線に全面降伏してしまうのではない、ということだ。生物は、動物に見られる免疫のように、自己の生体機能を防衛するための多様な機構を備えており、外界から加えられた不都合な作用と対決する。ＤＮＡの修復機構もその一つなのである。

　生物は微量の放射線によっても傷つけられる、それゆえわずかな放射線でも浴びるのは危険である、という論調に接することがしばしばある。その根底にある考えは、細胞のすべての生命活動の起点はＤＮＡが発する指令であり、放射線によって損傷を受けやすいこのＤＮＡがいったん傷つくと（元のＤＮＡが復元されることなく）、本来の遺伝情報が欠落するか、あらたに生成した異常な遺伝情報が被曝世代においては細胞から細胞へ伝えられてガンを引き起こしたり、あるいは生殖細胞を介して後続の世代に伝達されて突然変異を誘発したりする、というものである。この図式はけっして誤りではないが、生物は傷ついたＤＮＡを手段を尽くして治そうとする精妙な機構を備えている、という右に述べた事実に照らしてみると、〝鎧袖一触（がいしゅういっしょく）〟という感のあるこの図式のいささか決定論的な部分には、何らかの〝修復〟が施されねばなるまい。とりわけ、放射線量が少なく、受けた傷口がそう深くないような場合においては、そう考えられる。

第十一章　低線量放射線の刺激効果

放射線生物学の古くて新しい設問は、低線量放射線は、生体系に対しいかなる影響をもたらすか？　地殻・宇宙線などの自然放射線を浴びながら生物が進化してきた事実を踏まえるとき、低線量放射線は生物に対してむしろ有益な効果、すなわちホルミーシスをもたらしてきたし、また現にもたらしている、とは考えられないか？　というものである。

最初に二、三の用語の解説をしよう。

「ホルミーシス」とは、多量のときには毒性を示す物質などの作用源が、少量のとき生体に与える刺激効果のことで、換言すれば、有害量以下のレベルの作用源による生体系への正の刺激である。作用源には放射線も数えられる。「低線量」とは、動物では自然放射線の一〜二桁高い〇・〇一〜〇・一グレイ程度の放射線量とされるが、植物ではこれよりさらに一桁ほど高い。

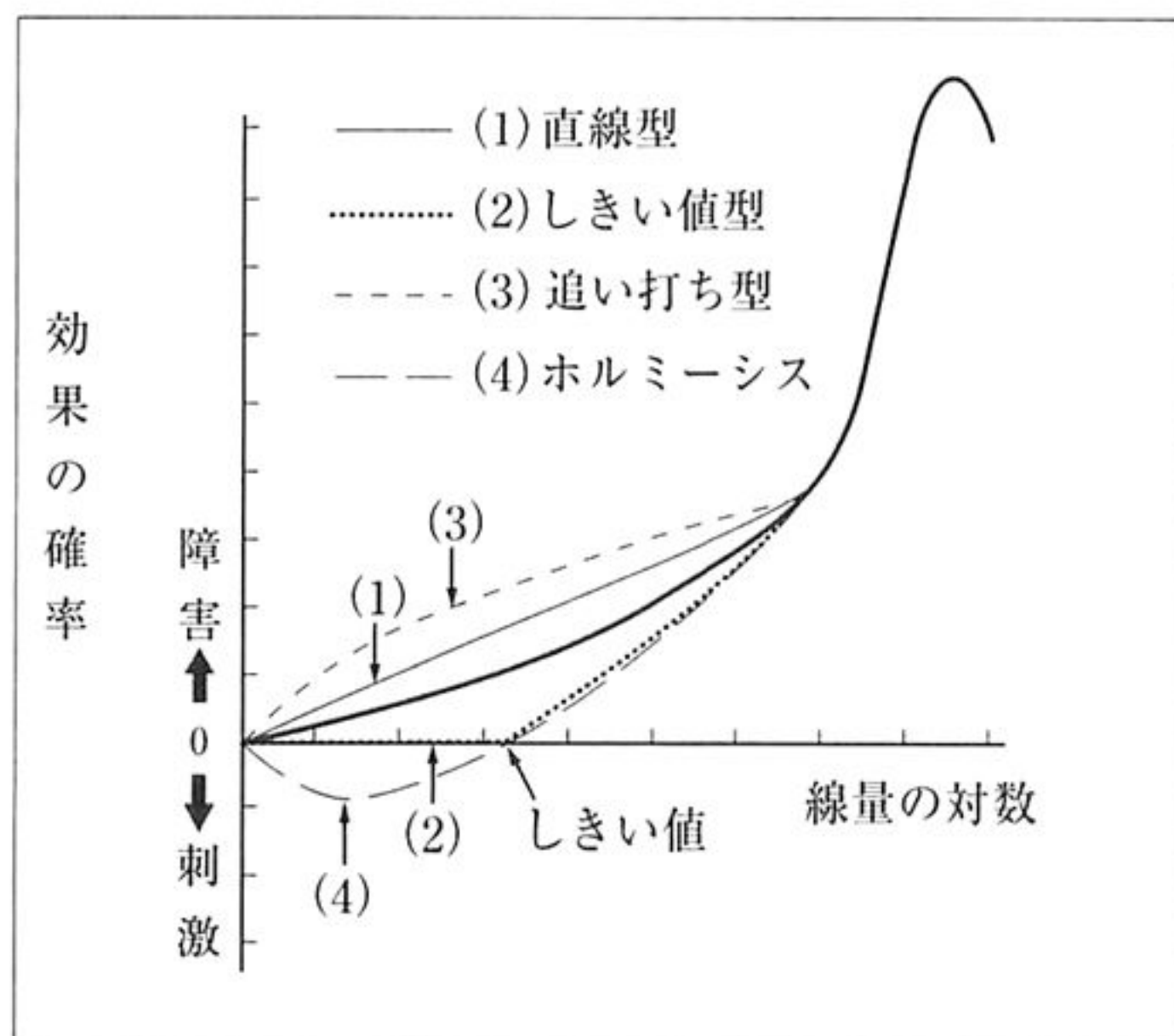
一　低線量域での線量-効果の関係

低線量域の線量-効果関係には、理論的に四つのタイプが考えられる（図11－1）。この図に

ケレラーとロッシが放射線の線量-効果関係に関して導入したグラフが太い曲線で示されている。

⑴直線となるタイプ
放射線管理の立場から確率的影響と呼ばれているもので、遺伝的影響・発ガンに見られる。ゼロ点から直線的に立ち上がるので、どんな低線量照射でも何らかの程度で効果がもたらされる。

⑵しきい値（または閾値［いきち］）を示すタイプ
遺伝的影響・発ガン以外のすべての効果に見られるとされる、いわゆる確定的影響である。しきい値、すなわちそれ以下では、回復のために効果が現れないという限界の線量があるとされる。

⑶障害を追い打ちするタイプ
タイプ⑴の低線量域における直線部分が上

（ファイネンデゲンら〔1988〕より改図）
図 11－1　線量-効果の考えうる四種の関係

部に膨らんでおり、追い打ちのダメージが加えられる。

(4)ホルミーシス

これは(3)とは逆となる。(2)のしきい値よりも低い線量域で効果がゼロとはならず、負の領域に入り込んで、刺激効果（有益効果）、すなわちホルミーシスが引き起こされる。

ヒトの被曝管理はこれまで、(1)と(2)にのみ着目して行われてきたが、それら以外に(3)や(4)が現実に存在するとなると、管理の面で問題が生ずることになろう。

(3)であれ(4)であれ、それらの存在を示す確かなデータが蓄積されていけば、被曝管理にとどまらず、放射線の生物作用についての一般的な理解も、のっぴきならない影響を受けるものと考えられる。

ここでとりあげるのは、(4)のホルミーシス、つまり「低線量放射線の刺激効果」である。

二　いろいろな例

効果の指標

指標としては、生理活性（例えば呼吸）・発芽率・孵化（ふか）率・増殖率（細胞分裂速度）・体重増加・寿命など、さまざまな生物現象を採用することができる。

表 11－1　生物活性に及ぼす放射線不足の抑制効果

報告年	生物	放射線量増減の条件	生物活性の変化
1958	ジャガイモ	宇宙線強度の変化	呼吸活性変化
1962	アルテミア(甲殻類)	トンネル内で10センチの鉛遮蔽を施す	孵化率 65%に低下，6ヵ月の処理で不妊となる
	オオムギ	〃　〃	発芽率減少
1970	ゾウリムシ(原生動物)	10センチの鉛遮蔽	増殖率が8ヵ月の間に対照の59%に低下
		同上，遮蔽内にトリウム232のγ線源を設置	増殖率増大
1971	ゾウリムシ	地表から 200メートルの地下(宇宙線強度が 1/5～1/10に減少)	増殖率が2日で対照の 47%に低下
		同上，さらに5センチの鉛遮蔽を施す	世代時間が7時間から10時間に遅延
1976	パラメシウム(原生動物)	10センチの鉛遮蔽	増殖率低下，世代時間延長
		同上，700ミリレントゲンを照射	対照のレベルに復帰
1978	パラメシウム	10センチの鉛遮蔽	増殖速度が対照の5%に低下
		5センチ　〃	〃　〃　10%　〃

（ラッキー〔1980〕より改変）

放射線不足の影響

表11－1に、実験的に放射線なしの条件に近づけた生物材料の活性にどのようなマイナスの影響が現れるかについて、これまでの研究が明らかにしてきた事実の一部を示した。いろいろな指標に関して、放射線不足が生物活性に抑制的に働くことが示唆されている。例えば、ゾウリムシを宇宙線の強さが地上の五分の一から一〇分の一に減少する地表から二〇〇メートルの地下で飼うと、その増殖率が地上での四七%に低下し、さらにこの状態で五センチの鉛による遮蔽で地殻放射線をも逓減すると、分裂から分裂までの一世代の経過時間が七時間から一〇時間に遅延した。

低線量放射線の刺激効果

次に低線量の放射線が生物活性を高めることを示す厖大な知見のほんの一部を紹介しよう。

〈高等植物の場合〉

植物のホルミーシスは、農作物の生産性向上の一手段としてすでに利用されている。種子に放射線をかけ、丈（たけ）・重量・成長速度・分蘖（ぶんげつ）数（イネやムギなどの、根に近い茎の関節から枝分かれする数）・摘み取り量・開花数などに及ぼす影響が調べられている。

ホルミーシスをもたらす線量範囲は、〇・五〜五〇〇レントゲン（約〇・〇〇五〜五グレイ）と、対象によって幅があるが、動物に比べて通常一桁ほど高い線量域でホルミーシスが現れる。

この効果は、放射線を照射した種子を直ちに播種したときに見られ、種子を照射後に貯蔵したのでは減少する。調べられた大半の農作物についてそれぞれに好適な条件（線量条件と生育条件）があり、品種によって、あるいは同一品種でも種子のロットによって、必ずしも同じ結果が得られるとは限らない。もたらされる有益効果の程度は小さく、通常、対照の一一〇％ほどに過ぎない。

ラジウムやウランを含む肥料を用いた場合の収穫増加も報告されている。これは吸収された放射性核種からの放射線による体内照射の効果と考えられる。各種の植物で最高四〇％の収穫増が記載されている。肥料一キロ当たり六グラムの片岩を混ぜた場合、ラジウムの量が六ピコ

キュリー程度になるという計算がある。植物が実際摂取する量はこれよりさらに少なくなろう。

〈動物の場合〉

昆虫（スズメバチとコクヌストモドキ）の寿命が放射線照射によって延長することが示されている。また、二つの独立した研究室がマウスを用いた実験で、放射線照射による体重の増加に関してほぼ同一の結果を出している。一日あたり五レントゲン（ほぼ五〇ミリグレイ）までの放射線を照射することによって、体重が対照の一一〇〜一三〇％に高まった。

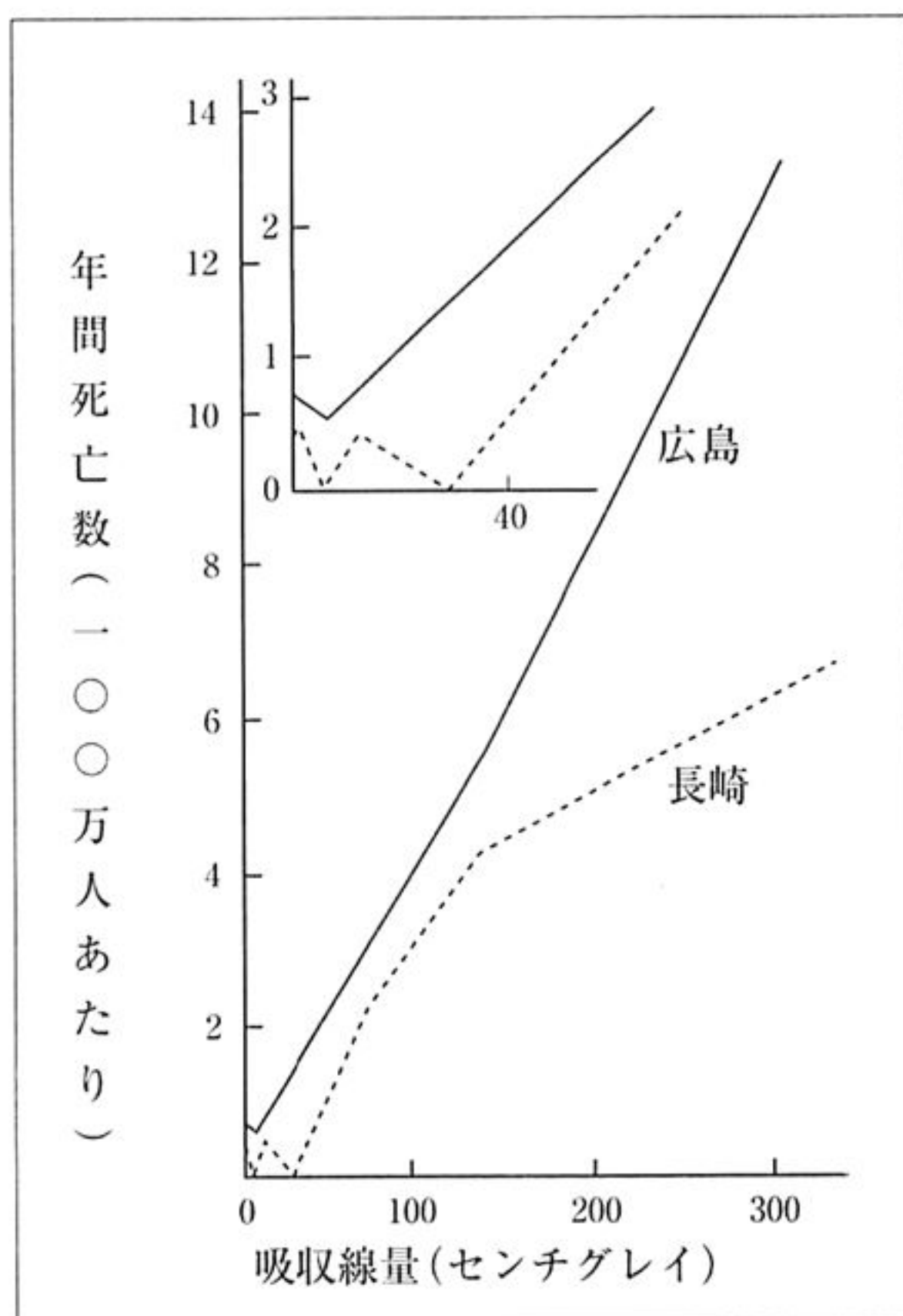
〈ヒトの場合〉

この地球上には、他の地域に比べて自然放射線のレベルの高い地方が知られている。このような地域では発ガン率がむしろ低いことを示すデータが中国・インド・アメリカ・フィンランドで報告されている。自然放射線が世界平均値の三倍という中国広東省では、ガンの死亡率がむしろ低い、という。

放射線作業業務者に関しては、アメリカのロッキーフラッツ・プラントでプルトニウム239の吸入を伴う作業に従事していた作業員についてなされた次のような調査が報告されている。対照には年齢・性を同じにする同一暦年（五年区分）のアメリカ人が選ばれた。七四ベクレル（二ナノキュリー）以上を吸入したと考えられる作業員三八六人における死亡数は六七名で、死亡率は対照におけるそれの七〇％であった。一方、ガンによる死亡数は一四名で、死亡率は対

照のそれの七〇%、さらに、この核種が引き起こす危険性がしばしば指摘されてきた肺ガンによる死者は一名で、死亡率は対照のそれの一四%に過ぎなかった、という。

　アメリカで放射線を扱う放射線科医の平均寿命が第二次世界大戦前には、それを扱わない眼科医・耳鼻科医の平均寿命に比べ短かったという報告がなされた（九七ページ）が、放射線の取り扱いが厳しくなった戦後に入局した医者では、この関係が逆転した。それは、放射線を低レベルで浴びるようになったことが健康に好結果をもたらしたためではないかとも考えられている。

　広島・長崎被曝生存者に見られる白血病発生率と被曝線量の関係を示すグラフ（図11－2）

（近藤の著書より引用）
図11－2　低線量被曝と白血病死亡率

から、低線量域では線量の増加に伴い発生率がむしろ減少している、と見る人もある。つまり線量-効果の関係は、図11－1のグラフ(1)ではなく(2)で与えられ、したがってICRPの勧告に逆らう形でしきい値を設定することも可能である、という。この場合、ごく低い線量域での発生率は自然発生率（線量ゼロにおける発生率で、一〇〇万人あたり〇・八人）以下であり、線量とともに増加し、ある線量で自然発生率に達する。この線量以下では発ガンが抑制されることになるので、この線量をホルミーシス様臨界線量と呼ぶ人もある。

このホルミーシス様臨界線量は、長崎の被曝者については胃ガン以外のすべてのガンに認められ、一方、広島での被曝者では長崎での被曝者ほど明白ではないが、ある程度その存在がうかがえるという（これは広島に投下された原爆が中性子放出型であったため、ともいわれる）。

このような主張に対しては、グラフ上の各点の信頼度はきわめて低く、直線として処理しても構わない、とする強い反論がある。

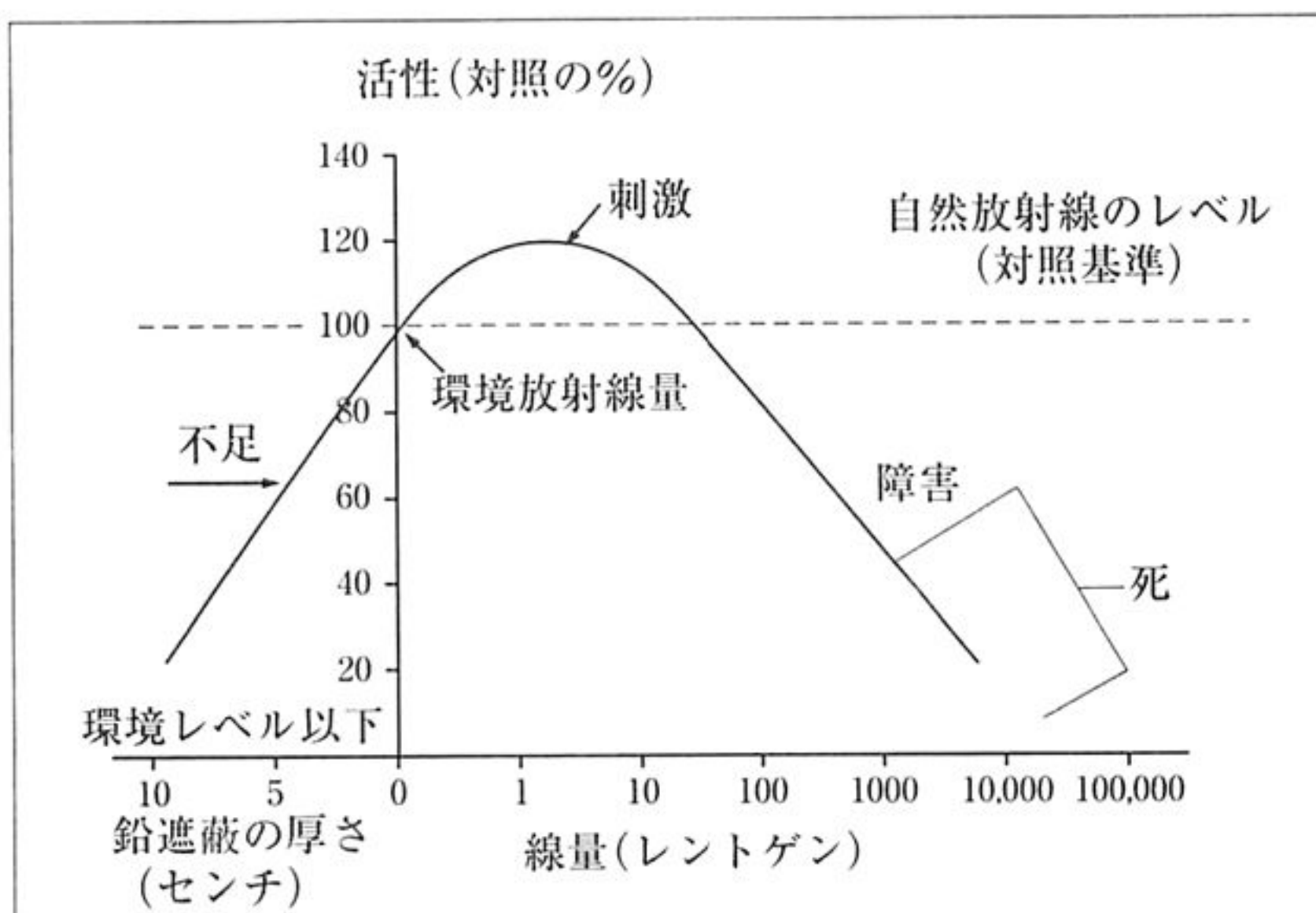
ラジウム温泉には治療効果がある、というイメージをわれわれはもっているが、もし実際に効果があるのなら、温泉にごくわずか含まれる放射性元素ラジウム（とラドン）から出る放射線が生体機能に対して促進的に作用した、と考えることもできる。しかし、私事にわたって恐縮であるが、某ラジウム温泉の水二リットルを徹底的に濃縮し、その残渣を高性能の放射線検出器にかけてみたが、自然放射線のレベルとの差は認められなかった。この民間伝承の療法が

(ラッキー〔1980〕による)

図11－3　線量-効果曲線の正しい表現

示す効験の科学的説明はまだなされていない。

低線量放射線は、ガン治療の実際に利用されていることが注目される。すでに述べた（三〇ページ）ように、悪性リンパ腫の治療にあたって、あらかじめ患者に低線量の放射線を全身照射し、ある期間を置いた後に高線量の放射線を患部に局所照射することによって、すぐれた成果があげられている。

三　放射線効果のより正確な表現の仕方

以上のような知見を考慮して、放射線の生物学的効果（活性）と線量の関係は、図11－3のように表すべきだ、という主張がなされている。すなわち横軸に線量の対数をとって低線量域を拡大し、線量不足領域を鉛遮蔽の厚さ(センチ)

で表すことによって、放射線の効果を広い線量域について表現できるようにする。自然放射線による生物活性を一〇〇%とするとき、これより上に出た部分がホルミーシス（刺激）を表すことになる。横軸の線量値は生物対象ごとに、また効果ごとに異なったものになる(表11－2)。

低線量領域の左側は、生物材料を鉛で遮蔽して放射線の量を自然環境のレベル以下とした場合の効果で、放射線不足による種々の負の効果（表11－1）が現れてくる。一方、右側の部分は、これまで放射線生物学の研究対象とされてきた高線量の放射線による効果で、各種の放射線障害や放射線死が引き起こされる。

表11－2　各種生物における低線量照射の刺激効果

生　物	刺激線量域（ラド）	刺激される効果
哺乳類	10^{-1}～10^{1}	成長，寿命
昆虫	10^{1}	成長
植物	10^{1}	発芽
	10^{2}～10^{3}	成長，収穫
コウボ	10^{3}	増殖
原生動物	10^{2}～10^{3}	増殖
細菌類	10^{1}	発芽
	10^{3}～10^{4}	増殖

（ラッキー〔1980〕より改変）

四　分子レベルでの研究

では、このような放射線ホルミーシスはどのような分子レベルの機構で起こるのか。そのような研究データなしに現象面の事実を示されただけでは、やはり納得できないものが残る。

この方面の研究は、一九七〇〜八〇年代に、フランスのパウル・サバティエ大学のプラネとその共同研究者が原生動物や藍藻類を用いてその先鞭をつけ、やや遅れてドイツのイェリヒ核研究センターのファイネンデゲンらによる、高等動物を材料とした研究によって深められ、現在、少なくない数の研究者がこの現象に関心を寄せ、あるいはその研究に従事している。

ここではファイネンデゲンらの研究をとりあげるが、研究内容が多岐に及ぶので、研究の狙い、大まかな方法、立論、結論の骨子を述べるにとどめる。

彼らはまず、マウスの全身に自然放射線のわずか一ケタほど高い〇・〇一グレイという低線量のγ線（セシウム137を使用）を浴びせた場合にも、その骨髄細胞のある生理生化学的活性が微妙に変動することを見出した。その変動とは、チミジンキナーゼという酵素の活性（以下TK活性と略称）の低下、それに伴って起こるDNA合成の減少、血清中のチミジン濃度の増加、の三つである。これらの指標、とくにTK活性が、さまざまな実験条件に置かれたマウスでどう変動するかが調べられた。

方法の概略はこうである。生後八〜一〇週目のマウスの全身に低線量のγ線を照射し、一定時間後に骨髄細胞および血清を取り出す。骨髄細胞を迅速に炭酸水素ナトリウム（$NaHCO_3$）の水溶液（一リットル中に一三五〇ミリグラム含み、pHが七・三〜七・四に調整されたもので、正常の生理的条件に近い液と考えられる）の中に採取する。彼らによれば、この操作と実験系が再

現性のある結果を出すのに不可欠であるという。最初の実験で確認されたのは、ＴＫ活性が照射後の時間に応じて正確に変動すること、この変動は自然放射線のわずか一〇倍程度の放射線照射によっても現れる、ということである。すなわち、この実験系と指標とが生体に対する低線量放射線の影響を調べるのに満足できるものであることが確認された。

次の実験では、低線量の放射線を照射したマウスに対し、照射後いろいろな時間を置いてから二回目の、高線量の照射を行った場合、この二回の照射を隔てる時間間隔が、二回目の照射後におけるＴＫ活性の変動にどのような影響を及ぼすかが調べられた。

その結果、最初の低線量放射線の照射によって、二回目の高線量の照射がもたらす影響を緩和できるような状態が細胞内に誘導されること、この状態は一時的なものであり、最初の照射からの経過時間とともに変動し、照射の四時間後に完成した（最高値に達した）のちに減退し始め、一二時間後までに消滅することがわかった。

問題は、この状態が細胞内のどこに生ずるか、そしてその実体は何か、ということである。

この設問に答えるために以下の作業仮説をたて、あるいは推論を行った。

――この状態は生体膜に生ずる。ＴＫ活性が最初の照射によって低下する原因は、放射線で生じたラジカルが膜結合性のＴＫに作用して、その活性を抑えることにあるのだろう。

――ラジカルは放射線以外の要因でも生成しうるので、人為的方法で細胞内のラジカル量を

増減させれば、それに対応してTK活性が減増するだろう。
——もしこの仮説が正しければ、マウスを、生体膜のラジカルを除去することが知られているビタミンEの慢性欠乏状態や、ラジカルの作用を助けるといわれる高磁場状態に置けば、そのTK活性は低下するだろう。

これらの仮説を検証するためになされた一連の実験（割愛）の結果、TK活性は、生体膜内で生成するラジカルによって、その誘因に関係なく非特異的に変動すること、つまり設問の状態は膜内に生ずることが示唆された。結論は次のようになる。

①低線量照射後、細胞内には、次の照射から受ける影響に拮抗する抵抗機構が一時的に構築される。

②この抵抗機構はラジカルを除く機構である。したがって、低線量放射線は、ラジカルを増やしてTK活性を低下させるという働きの他に、それとは逆にラジカルを除く機構を細胞内に構築させる働きをも行う。

このように、細胞内にラジカル除去機構を一時的に構築する低線量照射を生体が常に受けていれば、細胞内にラジカル防衛機構が常設されていることになる。そうならば、自然放射線が平均のレベルより数倍高い地域に住んでいる人たちの間に発ガンやガン死が少ない、という報告を、一概に紛（まが）いものとして斥（しりぞ）けるわけにはいかなくなるだろう。

第十二章　放射線の怖がり方

これまでの叙述で、放射線が引き起こす障害（影響）を、前半では主にヒトを中心に、そして後半では生物界全般に拡張して扱ってきた。本書を締めくくるにあたり、放射線（〝放射能〟）はどのように怖がるべきか、という設問に向き合ってみよう。

十分な事実にもとづいて一般化されたものとは考えにくい情報を論拠にした、「どんなに微量の放射線でも浴びたくないという願望、浴びないほうがよいという薦め、浴びてはならないという信念や主張」などに接することがよくある。放射線あるいは〝放射能〟はいっさい悪である、と。これには、いわゆる〝放射能〟や〝核〟に対する潜在的、感性的な恐怖心が絡んでいることを否定できない。この「公理」に対峙するのが、本章の課題の一つである。

主題に入る前に再度申し上げたい。怖いのは〝放射能〟ではなく、放射線である、と。俗語〝放射能〟は、放射性物質（放射性核種、放射性同位体（元素）、放射性化合物）も、放射線そのものをも意味する日本語として流布しているが、まずもってこの用語法が誤りであることを改めて吟味していただきたい。もう一つ追記したいことは、「被曝」を「被爆」と表現するのは間違いだ、ということである。両者は意味がまったく違う。生体がどんなにわずかな線量の放射線を受け

ても「被曝」なのである。被曝は爆発という現象を伴わなくても起こりうるからである。

考えるべき事柄

この被曝の状況にはいろいろなケースが考えられるが、さしあたり次のように分けよう。①自然条件下における被曝、②日常生活における被曝、③医療被曝、④事故・事件による被曝、⑤核爆発による被曝、などだ。①は古今東西にかかわりなく、われわれにとって不可抗力である、②は文明生活に随伴する性格のもの、③は健康の維持や長寿のためには止むをえないもの、④は起こりえないとはいえない事態、⑤はあってはならない状況、となろう。

被曝の結末を憂慮するときは、次のようなことがらを考えてみる必要がある。

(1)被曝した線量はどの程度のものか。上記の被曝状況①〜⑤にかなり乱暴に当てはめると、①および②は微小のレベル、③は低レベル（ガン治療の局所照射のように、場合によっては中レベルのこともありうる）、④および⑤は中〜高レベルとなろう。ちなみにヒトに何らかの急性の変化（リンパの一時的減少）の検出を可能にする最少の線量は、〇・二五〜〇・五シーベルト（二五〇〜五〇〇ミリシーベルト）程度とされており（ただしこの値は、文献間でかならずしも一致しているとはいえない）、これより低い線量では、急性症状が現れるとは考えにくい。

(2)被曝時間は？　総線量が同程度でも、一回で浴びたか、長期にわたって浴び続けたかが問

題である。放射性物質で汚染された区域に長期間居住するような場合は、放射線の線量率が低くても累積線量は大きくなり、確率的影響のリスクがそれだけ大きくなる。

(3)どんな放射線源か？　固定された線源か、移動可能な線源か。固定線源なら、それから十分離れれば被曝する危険性は薄れるが、移動可能な開封された線源の場合は、体外被曝以上に、体内被曝の結末が心配になる。ただし、その場合に問題にすべきなのは、放射性核種の〝長大な〟物理的半減期ではなく、生物学的排出を考慮に入れた有効半減期である。

(4)放射線源からの距離は？　放出された放射線が人体にとどく状況にあるかどうか。

(5)どんな放射線か？　(4)の放射線の飛行距離のほかに、生体に対する作用の仕方が問題になる。体外被曝では中性子線が、体内被曝ではα線がとりわけ危険とされるのはどうしてか。

(6)次世代への影響は？　個人の被曝線量より、集団全体が浴びた総線量を考えるべきで、例えば放射性物質が広域に拡散するような場合は、身体的影響は引き起こさない程度の低線量でも、多数の人が被曝する危険性が増加し、次世代への影響のリスクはそれだけ高くなる。

これらの具体的な内容については、これまでの諸章を必要に応じて読み返していただきたい。

微小ないし低レベルの被曝

まず、冒頭で引き合いに出した「公理」について考えよう。第六章で述べたように、人の体

の内外には自然ならびに人工の放射線源が発する放射線が飛び交っている。しかし、地球上に現存する生物がすべて、何がしかの量の自然の放射線を恒常的に浴びながらも存続（進化も含めて）してきたことはまぎれもない事実なのである。自然放射線源からヒトが浴びる放射線の線量は、世界の平均として一年に約二・四ミリシーベルトとされるが、この「被曝」は、宇宙線の届かない地圏深くに、地殻からの放射線をも遮断する厚い鉛で囲われた特製の住処を作って、その中に常住でもしない限りは避けることはできない。したがって、自然放射線の被曝をいっさい拒否することはほとんど不可能であるし、また意味のないことである。しかも、第十一章で述べたように、低線量の「被曝」がむしろ生物の活性を高める、というデータもある。

その上現代人は、自分の体の状態を認知したり健康を保持するために、それを拒否する人は別として、時としてかなりの線量の医療放射線を浴びることもある。法律で定められている一般市民の被曝線量限度値である年間一ミリシーベルト（作業員は五〇ミリシーベルト（細かな但し書きは割愛））には、この医療被曝や右に述べた自然放射線の被曝は含められていない。この一ミリシーベルトという値は、個人に放射線障害を発生させる危険線量からはほど遠い値である。それは、確率的影響を問題にする場合の実効線量当量限度値であって、人間の集団を統計的に扱う場合に意味をもち、被曝した個人の確定的影響の危険性を評価するための基準値ではない（第四章）。自然放射線源から不可抗力的に浴びる二・四ミリシーベルトという線量が、

一般市民の限度値一ミリシーベルト以上の数値であること、ある種の放射線診療では一回で数ミリシーベルトあるいはそれ以上の放射線を浴びるが、医療として重要であること、に注意しよう。被曝を問題にするときは、被曝と同一視されやすい〝被爆〟という言葉がかもし出す語感に惑わされることなく、ある線量の被曝が現実に生体にどんな影響をもたらしうるかを思慮する必要がある。小さい方の接頭辞（例えばマイクロ）の付いた線量の放射線を被曝しても健康に異常をきたす恐れはほとんどない、と考えてよい（ただし、放射線の影響について、安全と危険の境界の線量を定めることは、けっして容易な作業ではない）。これらの接頭辞に幻惑され、過剰反応することが無用の心労を招き、それが健康に悪影響を及ぼさないとも限らない。

話が厄介になるのは、放射線には健康に対するデメリット（不利益）の他に、医療を初め人間活動のいろいろな面で現実にもたらしているメリット（利益）もある、という事情のためだ。人類が放射線を利用しているのは、メリットがデメリットをはるかに凌駕する、という理解の上に立ってのことである。問題は、放射線とどのようにつき合っていくか、つまりメリットを最大限に引き出し、デメリットを極力抑えるにはどうすればよいか、なのである。そのさい、デメリットをもたらす原子核エネルギーの悪用、乱用ないしは誤用と、メリットをもたらしているその平和利用とを重ね合わせ、前者ゆえに後者をも槍玉にあげるのは、一面的な主張である。〝核〟という文字が「核」戦争と結びつくからという理由で、例えば「核磁気共鳴」とい

う学術用語から、戦争と関係のない「核」を外そうとするのは〝愚挙〟であり、これでは、核磁気という、放射線とはやや離れた物理学的現象の理解さえ危ういものにしてしまう。最近、ある国立大学で「核」の入った研究室名から〝世間的印象がわるい〟という理由でそれを除いたという記事に接したが、科学者には世間に対するこのような阿ねりは不要なだけではない。これでは〝核〟に対する恐怖心を煽るだけの結果におわり、原子核の秘密や現象を人々に正しく理解させる、という科学者本来の責務の放棄にもなりかねない。

〝放射能〟や〝核〟という言葉にまとわりついている〝怖さ〟のイメージから、ごくわずかの放射線被曝でも危険であり、放射線利用はいっさい悪である、としてしまう決めつけや思い込みを、本書で述べたさまざまな客観的な事実（例えば回復や修復の存在）に照らして見直していただきたい。それなしに、ただ、〝放射能〟や〝核〟や放射線は怖い、と拒絶反応を示すだけでは、この地球環境の中で不安に駆られながら生きていかねばならないし、また放射線を利用する進んだ医療を受けることもままならないだろう。

中ないし高レベルの被曝──反核運動のよって立つ論拠

この設問は、被曝の状況④および⑤と関連して出される。

このような状況下における放射線障害については、これまでの諸章、とくに四章および五章

でかなり詳しく述べた。

④の事件・事故のさまざまな具体的ケースについては第七章でとりあげた。世界的に見て、それらは皆無でも希有でもなかったが、頻発したともいえないだろう。固定された線源（各種の放射線発生装置やγ線照射装置など）からの放射線を多量に浴びて人命が奪われた事件は、人間の杜撰な線源管理によるものであって、通常の市民生活を営んでいるさいに、このような事件に遭遇することはまず希有といってよいだろう。問題は、放射性物質という移動性線源の大量の放出とそれらの環境への拡散を引き起こす原発事故である。そして⑤の核兵器の使用は、これらの物理現象を意図的に引き起こす、という点でその罪は幾重にも重い。しかも、事故前には放射性物質が地上の定点に固定されている原発の場合に比べ、放射性物質の広域散布のために爆発を大気圏で行う核兵器の場合は、もたらす被害は桁違いに大きい。いずれの場合も、その結末が憂慮される。

核兵器の実験・使用と、不測の事態を招くおそれがある原発とに反対する声が高い。このような状況を引き起こさせないための運動が、いわゆる反核運動と理解される。この主張のよって立つ生物学的根拠は何かについて、愚見を付加しよう。原爆の阿鼻叫喚（あびきょうかん）を描いた絵図を前にするときに噴き上げてくるような感情を抑えて理詰めで考えると、この質問に答えることに、けっこう難儀するのである。

二つの事象は〝放射能による人類の破滅〟という共通項で人々に受け取られているが、これらはまったく異次元のことであり、同列に扱うことはできない。なぜなら、核兵器が人命の剝奪を否定していないのに対し、原発を運転すること自体にはそのような意図はないという点で、両者は決定的に相違しているからである。ここでは、規模の点では他を圧倒し、それだけに理解しやすい核兵器の方から考えてみよう。誤解を招きやすいので明言しておきたいが、以下の拙論では、人間による人間へのいかなる殺傷行為をも否定することを大前提としており、それゆえ当然のことではあるが、核兵器の製造・保有・実験・使用は、いっさい認めていない。

広島・長崎で使用された核兵器は、短時間のうちに多数の人間を殺傷し、そのうえ急性放射線障害から回復した被曝者にも、晩発性の身体的障害との闘いを強いてきた。大量殺戮性や残酷さ、被曝世代の後遺症の過酷さが「反核」の第一の理由となっている、と見てよいだろう。

過去の歴史は、人類みずからが戦争・征服・抑圧・革命・報復・内乱などの、いわば「核なしの」手段を通しても人命の大量剝奪を幾度となく繰り返してきたことを示している。数万、数十万あるいはそれ以上の殺戮のなされた歴史的事変を列記するのに、大部の歴史書を繙(ひもと)く必要はない。そして今日でも、同じ国内での主義や宗教や民族の対立の中での殺し合い、あるいは〝正義〟や〝人道〟などの身勝手な言葉で自己正当化した他国民の命の簒奪(さんだつ)は止んでいない。

このような「核ぬきの」殺傷行為は、「核による」殺傷行為とどこが違うのか。不謹慎の誹(そし)

りを受けることを覚悟の上であえて申しあげるなら、どちらも殺傷行為であり、どちらも殺傷数に上限など設定してはいないという点では、まったく区別できないのである。放射線障害は一般に過酷な経過をたどるが、「核ぬきの」殺傷手段にも残忍さにおいては引けをとらないものがいくらでもあったし、現にある。両者の違いは、大量の人命剝奪がある長い期間にわたるのか、それとも一瞬のうちになされるのか、そしてそれが広い領域に及ぶのか、それともごく狭い範囲で遂行されるのか、要するに、殺傷効率とか殺傷密度とかの違いに過ぎない、という見方は冷淡過ぎるだろうか。

後遺症が過酷だから、という理由づけはどうか。「核」の生存者が、健康と生活の両面で重荷を負わされるのは、たしかに非人間的である。だが、これときわめて類似の事態は、例えば交通災害において、今の時点でも起こっている。死者の数は、わが国だけで年間一万人にも達する！　もし、これだけの人がある限られた空間の中で短時間のうちに命を落としたとしたら、原爆なみの阿鼻叫喚が現出し世論が沸騰するだろう。その上、さいわい命をとりとめても、健康障害や生活苦の地獄に落とされる人の数は、死者の何倍にも達しよう。したがって、核廃絶の根拠として後に引きずる「惨禍」を強調する論理も、交通災害や労働災害などの実態に目をつむるなら、公平を欠くことになろう。

それでは、原子核エネルギーの平和利用についてはどうか。それにかかわる事件・事故で急

性放射線障害で亡くなった人の数は、核兵器によって奪われた命の数から想像して、たいへんな数に達しているだろうと感じている人が多い。だが、一九八九年までの犠牲者は、全世界で二桁台の数字なのである(第七章)。その後の一〇年間にも、この数字に大きな追加はない。

しかし、とりわけ放射性物質をまき散らす事件・事故後に晩発性障害で亡くなるだろう人の数については、現時点では仮定にもとづくに過ぎないさまざまな数値が交錯しているが、「核」ぬきの戦争や各種の災害などの「核」以外の出来事によって命を落とす人の数をはるかに凌駕するほどにもなって、そのために人類の先行きが怪しくなるようなことは、あってはならない最悪の事態が起きない限りは、考えにくい。もちろん、このような事態の発生の危険性を指摘する意見が十分理に叶っている場合は、それに耳を塞いではならないのはいうまでもない。

では、「反核」のよって立つ根拠はあるのだろうか? それは、核兵器の使用やチェルノブイリ級の大規模な原発事故での核エネルギーの無制御な大量解放が、環境中の放射性物質と放射線の量を狭域的にも広域的にも高めることに寄与し、その結果として人類全体の資質を低下させ、ついには人類の安定した子のプールを膨脹させ、そのことが人類集団における有害遺伝世代継続を損ねる危険性を秘めている、という認識なのである。したがって、もし人類は子々孫々までその資質を落とすことなく存続していくべきである、という主張を肯定するならば、「制御できない核はいけない」という答えが理の当然として出てくるはずだ。蛇足ながら、国

際放射線防護委員会が、放射線の確率的影響、特に遺伝的影響を重視する勧告（第四章七三ページ以下）を出したのは、このような認識にもとづいている、と考えることもできる。

放言ついでに蛇足をもう一つ。「核」による人命の損失も「非核」によるそれも区別できない、とした私論の敷衍(ふえん)である。「核」エネルギーの使用を止めただけで、人の世が平和になるのか、というまことに難解な質問に答えようという試みでもある。今日、例えば身を守るためなら力の行使も止むをえない、とする現状固執の〝冷静な高論卓説〟に接することが多い。だがこの主張は、「核ぬき」などの条件をどんなに付けようとも、人命の犠牲を暗黙のうちに容認しないかぎり、けっして成りたたないことを確認しよう。ここで失われる命は、〝力〟のほんの一部という軽い扱いしか受けない。その一方で、殺傷事件が起きたり、人命救助の努力がなされたりすると、命の尊さ、重さが粛々と説かれる日常がある。これら軽重二つの相反する命の値踏みが世に厳然と併存しているのに、この不条理を指摘する声は不思議と聞かれない。しかし、すべての人が恒久の安らぎを得るには、まずこの理不尽を払拭しなければならないはずだ。「核」であれ「非核」であれ、いかなる形であっても失われた命は二度と戻ってこない。この冷厳な事実を踏まえて、人類はいつの日か、「核」「非核」を問わず、人命のあらゆる形態の抹消行為にあらがう論理と倫理を構築できるのだろうか？

あとがき

このようなものを書くに至った経緯や、その狙いなどについては、特に冒頭の第一章で、またその他の章でも折りにふれてすでに述べた。繰り返しになるが、本書の意図をもう一度、かいつまんで述べる執拗さをお許し願いたい。

もう三〇年以上も前のことになるが、以前から関心を寄せていた放射線生物学について、ある外国図書を、門外漢でありながら翻訳する機会があり、あとがきの中に次のようなことを書いた。「放射線生物学は、電離放射線〔=放射線〕の生体に対する作用およびその機構を研究する科学であるといわれている。電離放射線ということばになじみがうすいだけに、こう定義されても、この学問がどんなものであるかについてのイメージはすぐにはわいてこないかもしれない。しかし、電離放射線をかりに〝放射能〟におきかえてみると、この学問は私たちにとってにわかに身近なものになるはずである……」。この訳業の最中に気がついたのは、いわゆる〝放射能〟の怖さを扱った本でありながら、原著者がこの用語をほとんど使っていない、という事実だった。当時はそのことにあまり気を止めなかったが、その後、放射線とのかかわり合いが深まる中で問い返し、その理由を会得できるようになった。要するに、私たちが日常よ

く接し、感覚的にはその意味を知っていると思い込んでいる〝放射能〟という言葉は、（衒学的なことを言うな、というお叱りを受けるかもしれないが）実は学問的に定義されたものではなく、唯一の原爆被災国である日本の土壌にしっかり定着している通俗語である、ということだ。この俗語〝放射能〟は、本来の意味内容が人々にほとんど理解されていないまま、放射性物質や放射線など、それと関連はあるが、あきらかに異なる事象を表す学術用語さえ包摂するわが国特有の造語として、強大な影響力をもつに至り、人口に膾炙している。すなわち、〝放射能〟の三文字は度を越した危機感を醸成し、「〝放射能〟（本当のところは放射性物質や放射線である）はいっさい悪である」、とする問答無用の公理さえ生み出すにいたった。

実際にそうなのだろうか。そもそも怖いのは〝放射能〟なのだろうか。この設問に答えるのが、この本の目的の一つである。すなわち、

(1)放射能・放射線・放射性物質・放射性核種などの諸概念を混同・混用してはならない。放射能は実体概念ではない。すなわち生体に影響をもたらすのは放射能ではなく、放射線である(一章)。

(2)放射線が生体に及ぼす作用の研究が始まってからまだ一世紀しか経っていないが、この期間に人類が歴史に刻み込んだ足跡を垣間見る必要がある（二章）。

(3)放射線にはかならずその出所（放射線源）が存在しており、その知識が放射線の生物作用の理解に不可欠である。放射線源の一つが放射能をもつ物質、ということになる（三章）。

(4)放射線の生体に対する影響を理解するには、被曝の形、各種の量と単位、放射線障害の諸相などについての知識が必要である（四・五章）。人類の安定した世代継続のためには、わずかな線量であれ、人類集団の多数の構成員に及ぶ放射線被曝は避けなければならない（五章）。

(5)人間は、現に生活している自然環境の中で、あるいは人工環境の中で、なにがしかの量の放射線の被曝（どんなにわずかでも被曝である）を避けることは不可能である（六章）。問題は、人間がその営為によって、放射線源の取り扱いを誤ったり、環境における放射性物質と放射線のレベルを高めたりしてきたことにある（七章）。

(6)生体には放射線で受けた傷を取り除く精妙な機構が備わっている（十章）。

(7)最近の研究は、生体に対する他の作用源と同じように、放射線もその量（線量）によって、生体機能に対し促進的にも阻害的にも作用しうる事実を明らかにしつつある。すなわち、中〜高レベルの放射線が障害や死を結果するのに対し、微小ないしは低レベルの放射線は生体機能を活性化するように思われる（十一章）。「量次第で毒にも薬にもなる」という言葉のように。

以上のような語りの筋を一つの柱とし、先の設問に対峙してみた。

もう一つの柱は、第一の柱を支えるものとなるが、放射線生物学がどのような学問であるか、の解説である。〝放射能の罪悪〟についての意見陳述は、何らかのにわか仕込みで細切れの知識からではなく、この分野の十分な知識に支えられてこそなされるべきだと思えるのだが、現

実はかならずしもそうなっているとは思えない。そこで、きわめて基本的なことがらについて、紙幅の許す限り、放射線生物学の用語や成果などについての概説を追加した（八〜十一章）。

最後の十二章で、「放射線はいかに怖がるべきか」について、放言に近い私見を披露させてもらった。俗語〝放射能〟の暗く怖いイメージに惑わされることなく、後述の近藤博士のお言葉を拝借して、「放射線を正しく怖がろう」、という〝叩かれ甲斐のある〟提言である。

こういう内容を盛りこんだ書物の名称をどうするか。主題『〝放射能〟は怖いのか』は、世間の人たちに向け、いや一部の専門家にさえ向けて、〝放射能〟の曖昧な用語遣いに半畳を入れたい、という意味合いである。最近、週刊誌の記事や諸大家の著書にその定義づけを試みる傾向が出始めたが、この試み自体、〝放射能〟の理解がこれまでいい加減だったことの証だ。副題に添えた『放射線生物学の基礎』の叙述が本書の主題である。その内容から、この学問分野の主役が「放射線」であって、〝放射能〟ではないことを納得していただけると思う。

この世界への参入が遅かった〝半玄人〟の、とりわけ医学に関する知識の不足と経験の欠如とが引き起こした誤記や難渋な記述もあると思われるが、その点はご海容いただき、わかりやすいところから読み始め、読み進めて、本著の意図を汲みとっていただきたい。

拙著には、崇高な理念を掲げて原発に反対している人たちの活動に、結果的には水を差すだけのものだ、と抗議されかねない叙述も多い。だが、ここで述べたことがらは、勉強を進めて

いく中で、無理なく、つまり〝自然体で〟なしえた、現在の時点での一つの大まかなまとめに過ぎない。この作業を行うにあたってよりどころとしたのは、「科学的な事実にもとづいた科学的な判断」である。この場合、〝最良の〟「科学的な事実」とか、〝誠実な〟「科学的な判断」とかいった表現に見られる主観の介入する〝気張った〟形容詞を付けることはしない。このことを重視する立場に立って付言させていただくなら、あらかじめなんらかの結論を設定して、その結論に接近し、あるいはそれを強化するために行う資料の一面的収集や、論理の展開という手法を、私はとりたくない。誤解を避けるために申し添えるが、私自身は原発を推進するどんな団体や個人とであれ、いかなる形の関係も取り結んだことはないし、今後も関係をもつつもりはない。もちろん原発の推進をよしとするものでもない。どちらの立場の人もまず、事実に対する認識を広げ、深めようではないか、というのが私のささやかな申し分である。

本書を草するにあたってはいろいろな本を参考にしたが、特にお世話になったのは、近藤宗平博士ならびに旧ソ連のクージンその他の研究者の、多くの著書や論文の中に盛られている資料、着想、あるいは学説である。

近藤博士は、日本における放射線生物学研究の第一人者であり、もう三〇年も前に書かれた『分子放射線生物学』は、今日なおその輝きを失っていない名著との評価を受けている。大阪大学を退官された後に、ある講演会で一聴衆から受けた「ラジウム温泉はなぜ健康によいか」

という難問への解答を求めて低線量放射線の生物作用についての真摯な学究活動を継続され、『人は放射線になぜ弱いか』（講談社ブルーバックス）という書を世に贈られた。その中でなされている問題提起は、以前から抱いていながら、発言するのをためらわれていた考えを陳述するよう、私を鼓舞して下さった。博士にはこの場を借りてお礼を申し上げたい。

もう一人の先達クージンは、放射線殺菌の是非をめぐって一時期わが国で騒がれたことのあるラジオトキシン（放射線毒〔γ線照射によって生成すると危惧された毒性物質〕）の名と結びついている。言語の壁もあって、旧ソ連（現ロシアならびに旧ソ連構成諸共和国）でなされている放射線生物学の現状については知る機会に乏しい。しかし、旧ソ連時代からの隔月専門誌『Radiobiologiya』には数多くの研究者が研究論文を寄せているし、また、放射線生物学関係の著書も、欧米諸国からはほとんど手に入らないのに対し、毎年かなりの点数が出版されている。クージンは、旧ソ連の放射線生物学会にあって大御所とでもいうべき存在だった人物で、その学説、とりわけ放射線生物学的効果の発現で果たす時間的要因を考慮しない標的理論と対決した、その構造-代謝説は、たいへん参考になった。

本書ができるまでにお世話になった文春新書編集部の嶋津弘章さんに感謝の意を表したい。

二〇〇一年五月　佐藤満彦

生物学上の発見	原子核エネルギーの〝暴発〟
04　ピエル・キュリー：ラドン気体中の動物が数時間で死ぬことを観察	
06　ベルゴニエとトリボンドー：ベルゴニエ・トリボンドーの法則を定式化	
21　ホルツーゼン：酸素効果の発見	
24　クラウザー：標的説	
27　マラー：X線誘発突然変異	

付表　放射線と人類のつき合いの歴史　1

年代	年	物理学上・技術上の達成	年	治療・障害・防護
1890年代	95	レントゲン：X線の発見	96	ギルマー：胸部ガンの治療にX線を使用
	96	ベクレル：ウランの放射能の発見	96	ダニエル：X線の脱毛効果を発見 グードワン：X線脱毛器を考案
	98	ピエル=マリー・キュリー：塩化ラジウムの純化	97	フロイント：痣のX線治療に成功
	99	ラザフォード：α線・β線の発見	99	鼻背皮膚ガンのX線治療に成功
1900年代	00	ヴィラール：γ線の発見		
	02	ラザフォード：原子崩壊説の提唱	02	フリーベン：X線の皮膚ガン誘発を確認（1914年までX線誘発ガンの報告114例）
			03	X線による不妊の誘発
			05	エジソンの弟子ダリー：X線火傷で死亡
			05	鉱泉中にラジウムが発見され，ラジウムによる治療・ラジウム水の飲用が普及
1910年代	11	クーリッジ：熱陰極線管の発明		
	12	200キロボルト診断用X線装置の製作	12	一婦人トリウムXの過剰注射で死亡（体内被曝による急性死の例）
1920年代			20	ツァペルト：X線胎児小頭症記載
			21	英：ラジウム・X線防護委員会設立
	23	治療用X線管球の製作	24	夜光塗料工のラジウム中毒発見(29年までに15人，50年までに41人死亡)
	26	ガン治療用ラドンシード発明	25	国際放射線会議：0.2レントゲン以下／日を勧告
			29	トロトラスト（X線造影剤）使用開始（後年各種のガン誘発の原因となる）

	生物学上の発見		原子核エネルギーの〝暴発〟
42	ヘヴェシーとオイラー：人工RIリン32を用いて放射線によるDNA合成阻害を研究	45	ロス・アラモス原子力研究所臨界事故［2］*
47	デール：放射線の間接作用説	45	最初の原爆実験
49	パット：防護物質の発見	45	広島・長崎原爆投下〔1945年の死者約21万人．うち¼が放射線による〕
		54	最初の水爆実験［1］*
		57	ウィンズケール原子炉事故
		58	ユーゴ原子炉事故［1］*
		63	部分的核実験禁止条約
68	オルパー：放射線効果発現における生体膜の重要性を指摘	～80	列国の核実験続き，気圏に放出された全RIは，5000万キュリーに達したものと推定される
		79	スリーマイル島原発事故
		86	チェルノブイリ原発事故［28］*（RIの総放出量：1億キュリー）
		99	東海村臨界事故［2］*

*を付した［ ］内の数字は，早発性障害によると考えられる死者

付表　放射線と人類のつき合いの歴史　2

	物理学上・技術上の達成	治療・障害・防護
1930年代	31　ローレンス：サイクロトロン（原子核衝撃装置）の建造	
	34　ジョリオ＝イレーヌ・キュリー：人工放射能の発見	34　マリー・キュリー：再生不良性悪性貧血で死亡
	36　サイクロトロン製人工RIの配給	36　『顕彰書』第1版発刊．169名の犠牲者を記載．第2版（1959）では総数360名．日本では1972年まで55名の犠牲者
	38　ハーンとシュトラスマン：ウランの核分裂の発見	
1940年代	42　フェルミ：最初の原子炉の建造	
	46　原子炉製人工RIの配給	
1950年代	（50年代） 直線加速器 ベータトロン コバルト60γ線照射装置 の登場	（核医学の成立：RIの診療への利用） 50　国際放射線防護委員会（ICRP）正式に発足：0.3レントゲン以下／週を勧告 56　イレーヌ・キュリー：白血病で死亡 57　日本：『放射線障害防止法』施行 58　ICRP：公衆の被曝について勧告
1960年代	原発（動力用原子炉）の建造進む	65　ICRP：職業人および公衆の構成員の線量限度について勧告
1970年代		77　ICRP：職業人の線量当量限度として50ミリシーベルト／年を勧告
1980年代		81　日本：『放射線障害防止法』改正 85　ICRP：公衆の構成員の線量当量限度として1ミリシーベルト／年を勧告
1990年代		

参考図書（邦文の著訳書のみにとどめ、原論文はすべて割愛した）

シューバート、ラップ『放射線の恐ろしさ』［中村誠太郎、三好和夫訳］（一九五八）岩波書店
グロジェンスキー『放射線生物学入門』（一九六六）［佐藤満彦訳］（一九六八）東京図書
近藤宗平『分子放射線生物学』（一九七二）学会出版センター
舘野之男『放射線と人間』（一九七四）岩波書店（新書 九一三）
高木仁三郎『プルートーンの火』（一九七六）社会思想社（現代教養文庫 九〇二）
吉沢康雄『放射線障害を語る』（一九七八）東京大学出版会
ヤルモネンコ『放射線生物学の話』（一九七八）［佐藤満彦訳］（一九八一）東京図書
朝日新聞社原発問題取材班『地球被曝』（一九八七）朝日新聞社
日本保健物理学会編『放射線の人体への影響』（一九八八）日本保健物理学会
広瀬隆編著『原発がとまった日』（一九八九）ダイヤモンド社
寺島東洋三、市川龍資編著『チェルノブイリの放射能と日本』（一九八九）東海大学出版会
ラッキー『放射線ホルミシス』（一九八〇）［松平寛通監訳］（一九九〇）ソフトサイエンス社
草間朋子『放射能　見えない危険』（一九九〇）読売新聞社（読売科学選書 二八）
山口彦之『放射線と人間のからだ』（一九九〇）啓学出版
近藤宗平『人は放射線になぜ弱いか――第3版』（一九九八）講談社（ブルーバックスB-一二三八）
「人間家族」編集室編『原子力の時代は終わった』（一九九九）雲母書房
住田健二『原子力とどうつきあうか』（二〇〇〇）筑摩書房

佐藤満彦（さとう　みつひこ）

1933年、山形県鶴岡市出身。56年、東京大学理学部植物学科卒業。62年、同大学院博士課程修了。64年、都立大学理学部生物学教室勤務。助教授、教授を経て97年、定年退職。現在、都立大学・明星大学・早稲田大学非常勤講師。理学博士。植物生理生化学専攻。訳書に『西洋科学史』『放射線生物学入門』『細胞の化学』、著書に『ガリレオの求職活動　ニュートンの家計簿』(中公新書)などがある。

文春新書

177

〝放射能〟は怖いのか
——放射線生物学の基礎

平成13年6月20日　第1刷発行

著　者　佐藤満彦
発行者　東　眞史
発行所　株式会社　文藝春秋

〒102-8008　東京都千代田区紀尾井町3-23
電話　(03)3265-1211 (代表)

印刷所　大日本印刷
製本所　大口製本

定価はカバーに表示してあります。
万一、落丁・乱丁の場合は送料小社負担でお取替え致します。

ISBN4-16-660177-6

文春新書より

装幀：坂田政則

9784166601776

1920240006909

ISBN4-16-660177-6

C0240 ¥690E

定価（本体690円＋税）

佐藤満彦（さとう　みつひこ）

一九三三年、山形県鶴岡市出身。五六年、東京大学理学部植物学科卒業。六二年、同大学院博士課程修了。六四年、都立大学理学部生物学教室勤務。九七年、同大学教授を定年退職。現在、都立大学など数大学の非常勤講師。理学博士。植物生理生化学専攻。訳書に『西洋科学史』『放射線生物学入門』、著書に『ガリレオの求職活動　ニュートンの家計簿』（中公新書）などがある。

文春新書
177

〝放射能〟は怖いのか

放射線生物学の基礎

佐藤満彦

文藝春秋